



**Universidad
Zaragoza**

Trabajo Fin de Grado

**El glaciario marginal
en el entorno del Mediterráneo:
mirando al pasado y analizando el presente**

**Marginal glacierism
in the environment of the Mediterranean:
looking to the past and analyzing the present**

Autor/es

Claudia Giménez Poblador

Director/es

Juan Ignacio López Moreno (IPE-CSIC)

Alfredo Ollero Ojeda

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio

2021



Glaciar de Ossue, pico Viñamala (Pirineo Francés).

Resumen

Los glaciares y heleros son monumentos paisajísticos naturales y constituyen importantes vestigios del pasado, ya que albergan una cuantiosa y valiosa información en su interior. El cambio climático y, por lo tanto, el ascenso de temperaturas y la disminución de precipitaciones están provocando un grave retroceso en su extensión. En el entorno de la cuenca del Mediterráneo se localizan restos de masas heladas, cuyo momento álgido tuvo lugar durante la Pequeña Edad del Hielo (PEH); es por ello que, resulta de vital importancia estudiarlos y cartografiarlos, para poder analizar su situación actual, a través de distintos métodos como: la Línea de Equilibrio Glaciar y sus morrenas y, así, conocer mejor el pasado y recoger testimonios que sirvan de base para investigaciones futuras.

Palabras clave

Glaciares, Línea de Equilibrio Glaciar, morrena, nevero, Pequeña Edad del Hielo, Sur de Europa, cuenca del Mediterráneo, Alto Atlas, Turquía.

Abstract

Glaciers and ice patches are natural landscape monuments and are important vestiges of the past, as they host large and valuable information inside. Climate change and, therefore, rising temperatures and decreasing rainfall are causing a dramatic shrinkage. Around the Mediterranean basin are located remains of frozen ice bodies whose maximum extent in the last millennia took place during the Little Ice Age (LIA). It is of key to study and map them, to be able to analyze their current situation, using different methods such as the Glacier Equilibrium Line and its moraines and, thus, to know better the past and collect a baseline information that serve as a basis for future research.

Key words

Glaciers, Equilibrium Line Altitude (ELA), moraine, nevé, Little Ice Age, South of Europe, Mediterranean basin, High Atlas, Turkey.

ÍNDICE

1. Introducción	7
1.1. Justificación	7
1.2. Antecedentes	7
1.3. Objetivos	8
2. Metodología	9
2.1. Selección y búsqueda de glaciares a estudiar, a través de revisión bibliográfica	9
2.2. Localización e identificación en Google Earth de la superficie actual de los glaciares seleccionados (2021)	9
2.3. Cartografía geomorfológica y cálculo de las ELA's	9
2.4. Localización de las morrenas laterales más elevadas de cada glaciar y helero	10
2.5. Localización de las morrenas terminales y laterales para la estimación de la extensión de cada glaciar y helero durante la PEH	11
3. Área de estudio	11
4. Los glaciares: concepto y estudio	12
4.1. Causas de las fluctuaciones glaciares	18
4.2. Técnicas de estudio	22
5. Resultados	24
5.1. Glaciares de Aneto y Maladeta	25
5.2. Glaciar de Ossue.....	28
5.3. Antiguo glaciar Ghiacciaccio del Calderone.....	30
5.4. El extinto glaciar Zeleni Sneg	32
5.5. Helero I, II y III del Maja Jezercë	34
5.6. Glaciar Debeli Namet	36
5.7. El extinto glaciar Maja e Koljaet	38
5.8. Campos de hielo en el Olimpo	39
5.9. Glacieret Snezhnika	42

5.10. Glaciar en Ala Dagħ	44
5.11. Glaciares en el Monte Cilo	46
5.12. Campos de hielo en Tazaghârt (Alto Atlas).....	48
6. El futuro de los glaciares en el entorno de la cuenca del Mediterráneo.....	55
7. Discusión.....	57
8. Conclusiones	61
9. Agradecimientos	63
10. Referencias bibliográficas	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de los glaciares en el mundo. Fuente: Visible Earth NASA	13
Figura 2. Esquema representativo del funcionamiento de un glaciar como sistema. Fuente: Benn y Evans (1998) <i>Glaciars & Glaciations</i>	13
Figura 3. Modelo de un casquete glaciar, en el cual se representan las partes afectadas por la ablación, la acumulación y entre estas la línea de equilibrio. Fuente: Benn y Evans (1998) <i>Glaciars & Glaciations</i>	14
Figura 4. Tabla traducida de clasificación de los glaciares según geomorfología. Fuente: Benn y Evans (1998) <i>Glaciars & Glaciations</i>	14
Figura 5. Tipos de morrenas. Fuente: National Geographic	18
Figura 6. Imagen de la extensión de los casquetes Laurentino y Fenoescandinavo. Fuente: Wikipedia	19
Figura 7. Temperatura del planeta Tierra desde el Fanerozoico hasta el Holoceno. Fuente: Wikipedia	21

Figura 8. Temperatura del planeta Tierra durante el Holoceno. Fuente: Wikipedia	22
Figura 9. Curvas de reflectancia espectral para nieve y hielo en diferentes etapas de formación e imagen satelital. Fuente: Pandey, P. et al. (2015)	23
Figura 10. Mapa de localización de los glaciares cartografiados. Elaboración propia	25
Figura 11. Cartografía geomorfológica del Aneto y Maladeta (España) y sus ELA's. Elaboración propia	27
Figura 12. Cartografía geomorfológica del glaciar de Ossue (Francia) y su ELA. Elaboración propia	29
Figura 13. Cartografía geomorfológica del Ghiacciaio del Calderone (Italia) y su ELA. Elaboración propia	31
Figura 14. Cartografía 3D del glaciar de Triglav a lo largo de los años (1850 hasta 2012). Fuente: Anton Malik Geographical Institute, ZRC SAZU 2019	32
Figura 15. Captura de pantalla de la zona del glaciar de Triglav 2018 de Google Earth. Fuente: Google Earth	33
Figura 16. Captura de pantalla de la aplicación Land Viewer. Fuente: Land Viewer	33
Figura 17. Cartografía geomorfológica del Maja Jezercë I, Maja Jezercë II y Maja Jezercë III y sus ELA's (Albania)	35
Figura 18. Cartografía geomorfológica del glaciar Debeli Namet (Montenegro) y su ELA. Elaboración propia	37
Figura 19. Captura de pantalla de Google Earth del glaciar Maja e Koljaet en 2018. Fuente: Google Earth	38
Figura 20. Captura de pantalla de Google Earth del glaciar Maja e Koljaet en 2020. Fuente: Google Earth	39

Figura 21. Cartografía geomorfológica de los dos campos de hielo en Olimpo (Grecia) y sus ELA's. Elaboración propia	41
Figura 22. Cartografía geomorfológica del glaciaret Snezhnika (Bulgaria) y su ELA. Elaboración propia	43
Figura 23. Cartografía geomorfológica del glaciar cerca del pico Demirkazık (Turquía) y su ELA. Elaboración propia	45
Figura 24. Cartografía geomorfológica de los cuatro glaciares cerca del Monte Cilo (Turquía) y sus ELA's. Elaboración propia	47
Figura 25. Cartografía geomorfológica de los campos de hielo en Tazaghârt, Alto Atlas (Marruecos) y sus ELA's. Elaboración propia	49
Figura 26. Tabla de parámetros de los glaciares estudiados y cartografiados. Elaboración propia	51
Figura 27. Predicción de temperaturas establecido para un periodo de 30 años, del IPCC, aportado por el programa Copernicus. Fuente: Climate Copernicus	56
Figura 28. Imagen satelital de los glaciares del Monte Cilo, 2013. Fuente: Google Earth	59
Figura 29. Imagen satelital de los glaciares del Monte Cilo, 2006. Fuente: Google Earth	60

1. Introducción

1.1. Justificación

Los glaciares constituyen uno de los elementos geomorfológicos, hidrológicos y geológicos más singulares del paisaje. Su localización en la superficie terrestre es muy diversa, ya que se pueden encontrar en distintas latitudes, siempre que las temperaturas sean favorables para mantener su masa de hielo congelada (Benn y Evans, 1998). Sin embargo, en las últimas décadas están retrocediendo de forma prácticamente global, hasta el punto de llegar a su desaparición en diversas zonas de montaña, fundamentalmente en zonas tropicales y de latitudes medias. Dicho retroceso es debido fundamentalmente al ascenso de las temperaturas inducido por la acción humana, siendo uno de los principales efectos del cambio climático. Por este motivo, resulta trascendental recoger y analizar información acerca de su estado y extensión actual para compararla con el pasado.

Los glaciares no sólo son masas de hielo, sino que constituyen un factor decisivo en el clima, en el ciclo del agua, en el relieve, en los seres vivos, tanto plantas como animales, formando un delicado ecosistema cuya pervivencia peligra.

El presente trabajo intenta aportar una visión general del estado en el que se encuentran los glaciares marginales, concretamente los ubicados en torno a la cuenca del Mediterráneo. El hielo de sus glaciares y los restos geomorfológicos que han dejado albergan importantes datos acerca de glaciaciones y clima del pasado, valiosos vestigios que nos hablan de la historia geológica de nuestro planeta.

Precisamente, este mencionado deshielo está provocando que la mayoría de estos glaciares, sobre todo los incluidos en este estudio, estén sufriendo un proceso de degradación y transformación, de forma que su masa helada ya no puede considerarse dinámica, convirtiéndose así en heleros o neveros, es decir, en meras acumulaciones de hielo y nieve que aparecen y desaparecen según las condiciones meteorológicas, perdiendo parte de su masa y dinamismo.

1.2. Antecedentes

Para elaborar este estudio se han tenido en cuenta una gran cantidad de referencias bibliográficas aportadas por distintos especialistas en cuanto al glaciario. Sobre todo, artículos publicados en revistas y monografías científicas editadas en diversos países,

concretamente los trabajos realizados por: Benn y Evans (1998), dedicado a las glaciaciones y al glaciario, desde una perspectiva general, completándose con las investigaciones de Hughes (2014, 2018) y de Grunewald y Scheithauer (2010), que en ambos casos aportan información de los glaciares de la Pequeña Edad del Hielo, en el entorno del Mediterráneo.

Además, se han consultado aportaciones específicas como la publicada por: Del Gobbo et al. (2013) para el glaciar extinto de Triglav (Eslovenia), Gachev y Stoyanov (2012) para los glaciares del pico Maja Jezercë (Albania) y el glaciar Debeli Namet (Montenegro) en los Balcanes, Gachev (2011) para el glacieret Snezhnika (Bulgaria), Doreface et al. (2000) para el Ghiacciaio del Calderone (Italia), y Chueca (2002) para el Pirineo aragonés (España y Francia).

1.3. Objetivos

El objetivo principal del siguiente estudio es analizar los restos del glaciario en la actualidad, en concreto en las zonas bañadas por la cuenca del Mediterráneo.

Para alcanzar este propósito se han planteado los siguientes objetivos secundarios:

- Identificar y seleccionar los glaciares y heleros a estudiar, ubicados en el entorno de la cuenca del Mediterráneo, tanto en el sur de Europa, como en el norte de África y en el extremo oeste del continente asiático, concretamente en la península de Anatolia.
- Analizar el estado actual de cada glaciar, helero y sus morrenas, para levantar una cartografía, a partir de las imágenes aéreas de Google Earth.
- Representar cada glaciar y helero y sus líneas de equilibrio glaciar (ELA's), mediante el método XX, a través del software elaborado por Pellitero et al. (2015).
- Aportar una aproximación del cambio en la ELA, a través del estudio de localización de las morrenas laterales más elevadas de cada glaciar y helero estudiado.
- Comparar la extensión actual con la de épocas pasadas, en concreto con la Pequeña Edad del Hielo.
- Comprobar los efectos inducidos por la acción antrópica en los últimos años.

2. Metodología

2.1. Selección y búsqueda de glaciares a estudiar, a través de revisión bibliográfica:

Se ha realizado a partir de la lectura y análisis de diferentes artículos científicos y libros, redactados por los expertos en las últimas dos décadas, momento en el que se constata el aumento de las temperaturas y como consecuencia el deshielo de algunos glaciares.

Tras seleccionar una lista con 10 glaciares y 13 heleros ubicados en diversos países europeos (en los Pirineos entre España y Francia, en el macizo del Gran Sasso de los Apeninos en Italia, en los Alpes Julianos en Eslovenia, en los Alpes Dináricos entre Albania y Montenegro, en el Monte Olimpo en Grecia y en los montes Pirin en Bulgaria), norteafricanos (en el Alto Atlas, en Marruecos) y en la zona asiática próxima al Mediterráneo oriental correspondiente a Turquía (tanto en la cadena montañosa Ala Dagh o Antitauro, como la parte más próxima a Anatolia, cerca del Monte Cilo).

2.2. Localización e identificación en Google Earth de la superficie actual de los glaciares seleccionados (2021).

Cada uno de los glaciares, heleros y morrenas se han localizado y digitalizado, utilizando las fotografías aéreas de Google Earth, extraídas a partir de distintos satélites Sentinel, desarrollados a partir del programa Copernicus de la Unión Europea, así como el programa Landsat promovido por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos.

2.3. Cartografía geomorfológica y cálculo de las ELA's.

Antes de proceder a la cartografía de los glaciares, heleros y morrenas digitalizados se ha extraído una serie de modelos digitales de elevación (MDE) para poder representarlos. En el caso del MDE para la zona del Aneto y Maladeta se han obtenido a partir del Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional (IGN), con una resolución de 5 metros. Mientras que para todos los demás se ha utilizado un MDE, procedente de la plataforma Global Land Monitoring, con una resolución de 25 metros. Por lo tanto, algunos mapas presentan mayor resolución que otros, debido principalmente a la falta de disponibilidad de datos.

Para la representación de glaciares, heleros y morrenas se han exportado las formas dibujadas sobre la imagen de Google Earth al programa ArcGIS versión 10.7.1, para

poder cartografiarlos y comparar su extensión actual frente a la que dispusieron durante la Pequeña Edad del Hielo, a través de la aplicación del software desarrollado por Pellitero et al. (2015), el cual permite la representación de las Líneas de Equilibrio Glaciar (ELA a partir de aquí).

La técnica utilizada para el cálculo de la ELA ha sido el: *AABR* (Área-Altitude Balance Ratio) and *AA*, ya que es el más completo, en su origen fue desarrollado por Osmaston (2005), para lo que es necesario los MDE anteriormente comentados. Se basa en las diferencias entre los gradientes de acumulación y ablación, de forma que se obtiene la contribución del balance de masas del glaciar. Para reflejar la ELA de cada glaciar y helero, se ha utilizado el mencionado software de Pellitero et al. (2015), para su aplicación en ArcGIS versión 10.7.1. En concreto, se ha delimitado con un intervalo de 10 metros al tratarse de zonas muy pequeñas y una ratio de 1.75, ya que es la utilizada por defecto. El *AABR* es calculado a través de la hipsometría y representado en la siguiente fórmula:

$$BR = \frac{\bar{Z}_{ac} A_{ac}}{\bar{Z}_{ab} A_{ab}}$$

De forma que:

\bar{Z}_{ac} : es la altitud media del área de acumulación.

A_{ac} : es la altitud media del área de ablación.

\bar{Z}_{ab} : es área de acumulación.

A_{ab} : es el área de ablación.

Como resultado se han digitalizado los glaciares, heleros, morrenas de la PEH, los picos y la ELA de cada uno de estos. Para una mejor representación se han realizado, a partir de los MDE, los mapas de sombras a través de la herramienta *Hillshade*.

2.4. Localización de las morrenas laterales más elevadas de cada glaciar y helero.

A partir de los mapas elaborados en los que se representa tanto el glaciar o helero y sus respectivas morrenas, se han seleccionado las morrenas laterales más elevadas, en cuanto a su ubicación, para poder tener una aproximación al cambio que sucede en la Línea de Equilibrio Glaciar (ELA); ya que este dato puede considerarse un interesante testimonio

del cambio térmico, al reflejar el momento en el que se produce el proceso de fusión o deshielo al estar por encima de 0° C. En cuanto a la configuración de las leyendas se han tomado como referencias los criterios de Peña Monné et al. (1997).

2.5. Localización de las morrenas terminales y laterales para la estimación de la extensión de cada glaciar y helero durante la PEH.

Tras cartografiar las morrenas terminales y laterales, como se ha expuesto en el anterior apartado, se ha calculado la extensión de algunos glaciares y heleros, mediante una estimación realizada con el software ArcGIS versión 10.7.1, dado que no se disponían datos de la extensión que alcanzaban durante la Pequeña Edad del Hielo, para así poder comparar la situación actual con la pasada. De forma que se han dibujado los contornos correspondientes con la herramienta *Editor* y, posteriormente, los valores obtenidos se han reconvertido en hectáreas.

3. Área de estudio

Los glaciares y heleros seleccionados ubicados en los países ribereños al mar Mediterráneo son los siguientes:

- Cordillera de los Pirineos: Aneto, Maladeta y Ossue (España y Francia).
- Montes Apeninos: en concreto, cerca del Parque Nacional del Gran Sasso y Montes de la Laga: el helero del Ghiacciaio del Calderone (Italia).
- Alpes Julianos: el extinto glaciar de Triglav (Eslovenia).
- Alpes Dináricos: los glaciares Maja Jezercë 1, Maja Jezercë 2 y Maja Jezercë 3 (Albania) y el glaciar Debeli Namet (Montenegro).
- Monte Olimpo: campos de hielo (Grecia).
- Montes Pirin: el glacietet Snezhnika (Bulgaria).
- Montes Tauro: el glaciar cercano al pico Demirkazık y en el pico Cilo: 4 glaciares (Turquía).
- El Alto Atlas: campos de hielo en el monte Tazaghart (Marruecos).

Los glaciares que se han seleccionado, para este estudio presentan una serie de características similares, que explican su existencia a día de hoy, como la orientación noreste y, por lo tanto, localizándose en zonas de umbría, la elevada altitud a la que se

encuentran (por encima de los 3.000 m), grandes aportaciones a partir de las precipitaciones invernales y alimentación a partir de avalanchas. La litología es otro factor importante, ya que la mayoría se asientan sobre calizas y/o mármol, de forma que permiten la excavación y ocupación de dolinas, además de promover un proceso de karstificación.

La mayoría de los glaciares, heleros y/o neveros estudiados (a excepción de los ubicados en el pico Cilo, en la península de Anatolia) son de tamaño pequeño, es decir que presentan una extensión menor a 0.01 km², según Colucci y Guglielmin (2015) o 0.5 km según Huss y Fischer (2016). Este tipo de glaciares son muy importantes, a pesar de sus modestas dimensiones, ya que suponen el 80% del total de glaciares ubicados en cadenas montañosas en torno a latitudes medias-bajas.

4. Los glaciares: concepto y estudio

Según el Informe de Síntesis de Cambio Climático por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, más conocido en inglés por sus siglas como IPCC (2007, p. 82), un glaciar es una:

Masa de hielo terrestre que fluye pendiente abajo por efecto de la gravedad (mediante deformación interna y/o deslizamiento de su base), constreñida por el esfuerzo interno y por el rozamiento en su base y en sus lados. Los glaciares se mantienen por la acumulación de nieve en grandes altitudes, compensada por la fusión en altitudes bajas o por la descarga vertida al mar.

Por lo tanto, un glaciar es una masa de hielo dinámica y de agua dulce, por lo que suponen grandes reservorios de este bien tan preciado. Ocupan en torno a un 10% de la superficie terrestre, es decir casi 16 millones de km², concentrándose en Groenlandia y en el continente helado de la Antártida.

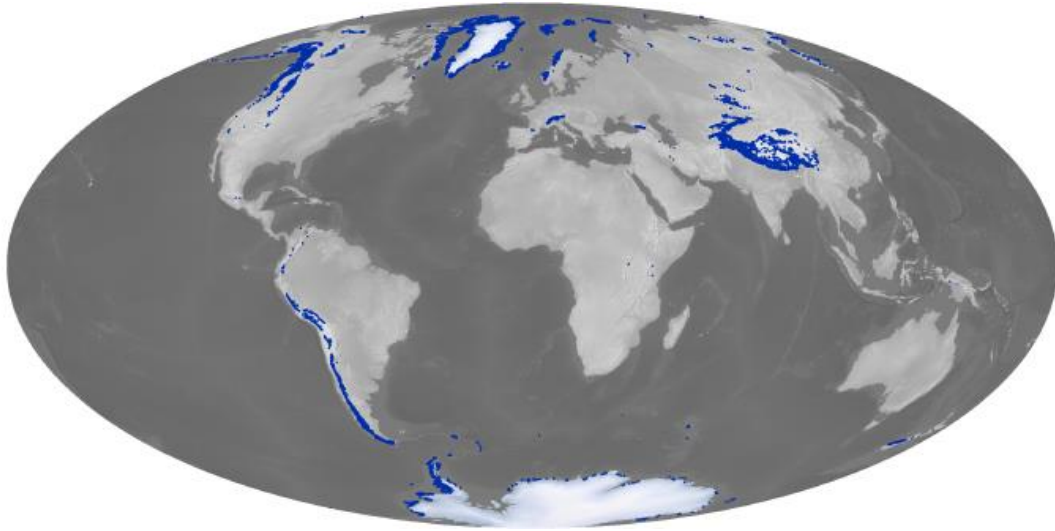


Figura 1. Distribución de los glaciares en el mundo. Fuente: Visible Earth NASA.

Funcionan como un sistema, de forma que reciben una serie de entradas o inputs, a través de la precipitación en forma de nieve, radiación solar, entre otras. Y unas salidas u outputs como el deshielo del agua que contienen, el vapor, los detritos que abandonan el glaciar... Para ello, a continuación, se expone una figura que representa este complejo sistema.

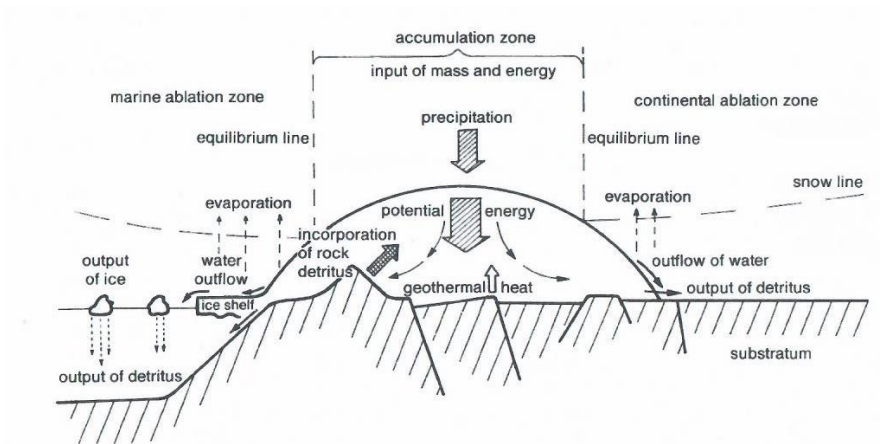


Figura 2. Esquema representativo del funcionamiento de un glaciar como sistema.

Fuente: Benn y Evans (1998), *Glaciers & Glaciations*.

Los glaciares pueden ser divididos, principalmente, en dos partes, de forma que se diferencia por un lado la zona de acumulación, es decir dónde la precipitación nival es mayor y, por lo tanto, resiste ante las pérdidas de fusión, mientras que, por otro lado, se localiza la zona de ablación, en la cual estos procesos se revierten.

Están separadas por una línea fronteriza en la que tanto las pérdidas y las ganancias son iguales, con un balance de masa anual cercano a 0 milímetros, conocida como la Línea de Equilibrio Glaciar (*Equilibrium Line Altitude, ELA*).

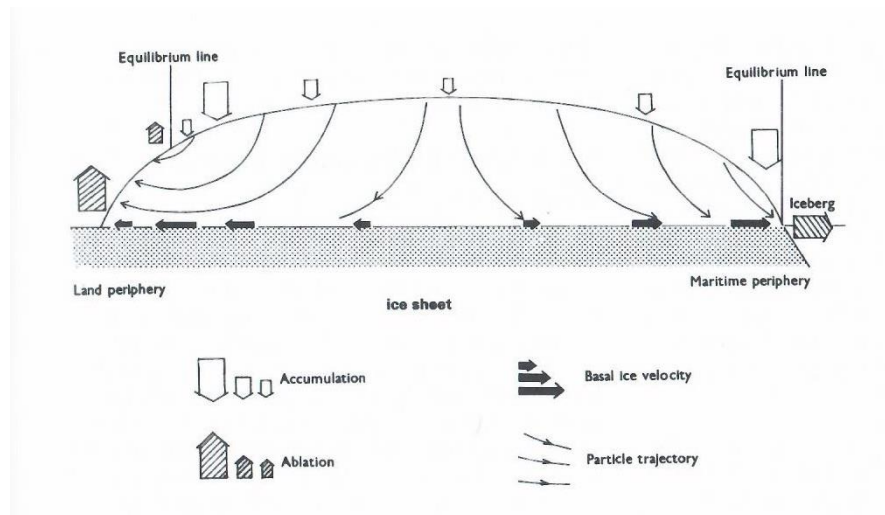


Figura 3. Modelo de un casquete glaciar, en el cual se representan las partes afectadas por la ablación, la acumulación y entre estas la línea de equilibrio.

Fuente: Benn y Evans (1998), *Glaciars & Glaciations*.

La clasificación de glaciares es diversa y diferente, en función de cada autor. Según los geógrafos británicos Benn y Evans (1998), se pueden llegar a dividir los distintos tipos de glaciares en base a la morfología que presentan, de forma que se diferencian entre:

<i>Clasificación de primer orden</i>	<i>Clasificación de segundo orden</i>
<i>Casquete glaciar o inlandsis no restringidos</i>	Domos de hielo Corrientes de hielo Glaciar de desagüe ("outlet glacier")
<i>Glaciares controlados por la topografía</i>	Campos de hielo Glaciares de valle Glaciares de transección Circos glaciares Glaciar de piedemonte Nicho glaciar

<i>Glaciares marinos</i>	Glaciaret
	Delantal de hielo
	Franjas de hielo
	Hielo ascendente
	Glaciar de plataforma de hielo
	Glaciar de plataforma de hielo-mar

Figura 4. Tabla traducida de clasificación de los glaciares según geomorfología.

Fuente: Benn y Evans (1998), *Glaciars & Glaciations*.

En el presente trabajo se tratarán sobre todo los glaciares controlados por la topografía, en concreto los de valle, los circos glaciares, los nichos glaciares y los heleros, ya que todos se encuentran localizados en áreas de montaña.

Los glaciares de valle son aquellos en los que el hielo procede de campos de hielo o de circos y desemboca en un profundo lecho rocoso, arrancando desde una zona que posee mayor altura hasta llegar a una de menor altitud. A su paso este puede poseer una forma detrítica o simple, es decir en forma de un solo camino. Frente a la cara del glaciar hay pendientes que carecen de hielo, por lo tanto, estas alimentan al glaciar al aportar hielo o nieve procedente de las avalanchas y restos de piedras. Este tipo de glaciar puede formar sistemas interconectados, por lo que recibirá el nombre de glaciares de transección.

Los circos glaciares son aquellos que se encuentran confinados en las cabeceras de los valles, encajados en huecos de lecho rocoso. Además, presentan un ensanchamiento de la cuenca en los tramos más altos y, por ello, el flujo de este tipo de glaciar permite la subdivisión de sus componentes pertenecientes a la cobertura y a los que divergen.

Los nichos glaciares, a diferencia de los anteriores, alcanzan menores dimensiones. Dentro de las montañas y/o valles se localizan en bancos de rocas o nichos, de ahí su nombre.

Por último, los glaciarets o parches glaciares formados a partir de avalanchas de nieve o por acumulación. Según Grunewald y Scheithauer (2010), poseen una serie de características:

1. Cuasi permanencia.
2. Hielo y firn con una densidad de más de $0,6 \text{ g cm}^{-3}$ y en el fondo en torno a $0,8 \text{ cm}^{-3}$.
3. Capas perennes de firn.
4. Un área de al menos 10.000 m^2 y un grosor de varios metros.

Es decir, son pequeños parches de hielo-neviza permanentes y también pueden recibir el nombre de “microglaciares”.

La degradación progresiva de los glaciares generada por el aumento de las temperaturas, que provoca la pérdida de su masa, transformándolos en heleros o neveros, denominados así a las masas de hielo que carecen de dinamismo. Algunos expertos, incluso, diferencian entre ambos conceptos, considerando que:

- Un helero constituye una acumulación de nieve y hielo con características sensiblemente distintas a los glaciares que, debido a su menor extensión, albergan una menor cantidad de nieve, perdiendo su dinamismo y, por lo tanto, su capacidad para desplazarse.
- Un nevero, por otro lado, también es una acumulación de nieve, pero de carácter temporal, hasta el punto de que puede aparecer y desaparecer, debido a las oscilaciones térmicas, sobre todo en la época estival.

Por lo tanto, estos parches de hielo o nieve son estáticos y pudiendo diferenciar dos tipos, según Serrano et al. (2011), de forma que algunos de estos parches de hielo han sido herencia de antiguos glaciares, mientras que otros han sido simplemente formados por acumulación de hielo. Aunque a veces esta distinción basada en el origen sea muy compleja.

Estas importantes masas de agua helada ejercen influencias en el paisaje, ya que son agentes de erosión, formando diferentes formas de relieve (valles, circos, fiordos, rocas aborregadas). Son capaces también de transportar (de forma supraglaciaria, endoglaciaria y subglaciaria) y sedimentar. Alteran el clima global ya que son responsables de los cambios de presión en el sistema y de la dirección de las corrientes de viento, ejerciendo una notable influencia tanto local como global. En cuanto a los océanos promueven los

diferentes cambios de nivel: glacioesutasia, glacioisostasia, hidroisostasia y eustasia geoidal.

Las morrenas son depósitos de un glaciar y, por tanto, constituyen el material que es abandonado por este, formando así un tipo de modelado glaciar. En general, están compuestas por material suelto procedente de roca y suelo, que ha arrancado el glaciar. A través de la liquenometría se pueden datar por lo que son una gran fuente de información, ya que se pueden estudiar las extensiones que podían llegar a alcanzar los glaciares. Podemos distinguir cuatro tipos de morrenas, que serán expuestas a continuación mediante una imagen que las ilustra, como son:

1. La morrena lateral: formada en los márgenes o bordes de los glaciares. En general estas se localizan a ambos lados de una cresta, por lo que la altura será similar.
2. La morrena central se produce cuando dos glaciares convergen, de forma que ambas morrenas se unen formando una línea de detritos. Esta puede estar dentro y fuera del glaciar. En el caso de que se derritiera la masa de hielo, el paisaje resultante sería una extensa cresta en el centro del valle.
3. La morrena supraglacial se localiza encima del glaciar, como bien dice su nombre. Su formación se debe a la caída de material sobre este, de forma que tanto las morrenas laterales y mediales pueden ser también supraglaciales (depende de dónde se encuentren). En el momento en el que hielo desaparezca, la morrena se reparte longitudinalmente por el valle.
4. La morrena terminal o final y como su nombre indica se forma al final del glaciar. Esta ofrece una importantísima información a los científicos y expertos, ya que ofrece una visión acerca de la dirección del antiguo glaciar.

Cuando los detritos no tienen una forma uniforme, se les denominará como *tills*, ya que poseen una baja clasificación granulométrica y se localizan en formaciones asociadas a río y hielo (fluvioglaciares).

Moraine

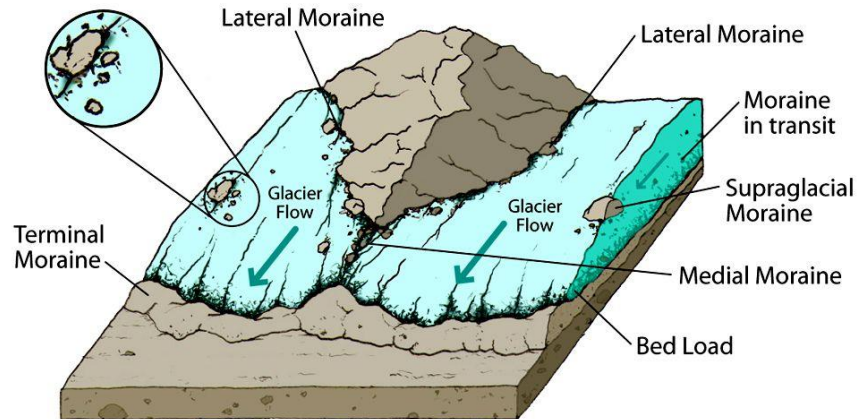


Figura 5. Tipos de morrenas. Fuente: National Geographic.

4.1 Causas de las fluctuaciones glaciares

La configuración de las masas de hielo está condicionada por los cambios de la órbita de la tierra alrededor del sol y, según los ciclos o teoría del astrofísico Milankovich, se forman teniendo en cuenta:

1. La excentricidad de la órbita de la Tierra cada 100.000 años.
2. La inclinación del eje de la superficie terrestre con una periodicidad de 41.000 años.
3. La precisión de los equinoccios, alterando las estaciones cada 23.000 años.

Este tipo de cambios producen efectos en cadena, afectando por lo tanto al sistema terrestre y la respuesta de los glaciares será diferente (avanzando o retrocediendo). El papel de los volcanes y de las manchas solares es también de vital importancia para explicar las fluctuaciones de los glaciares, aunque a diferencia de los ciclos de Milankovich, estas serían a una escala temporal más breve, como sucede con la Pequeña Edad del Hielo, expuesta más adelante.

En cuanto a la historia geológica de la Tierra, para el presente trabajo se ha de partir desde las primeras glaciaciones. Se piensa que la más antigua se produjo en el supereón Precámbrico hace 4.600 millones de años hasta 570.000 millones de años (ma), en concreto en el Proterozoico (2.500 ma -542 ma), durante la *Glaciación Huroniana*, cuyos sedimentos en su mayoría subacuáticos dibujaron diferentes formas glaciares, y posteriormente le suceden distintas glaciaciones.

En la era Paleozoica (hace 541 ma hasta 252 ma), tuvieron lugar diversas glaciaciones a lo largo de los diversos periodos: Ordovícico, Devónico y Carbonífero. Seguidamente entre la era Mesozoica-Cenozoica, en concreto en el periodo Paleógeno (66 ma -23 ma), en la época Oligocena, (34 ma -23 ma) se formó el casquete glacial de la Antártida. Y, a continuación, durante el Mioceno (23 ma - 5 ma) y Plioceno (5,3 ma - 1,8 ma) se formaron los casquetes polares septentrionales: Fenoescandinavo localizado en el norte de Europa llegando a alcanzar latitudes medias como Gran Bretaña, la parte norte de Alemania, Estonia, Letonia, Lituania... Y, por otra parte, el Laurentino, ubicado en Norte América, cubriendo Groenlandia, la península del Labrador, la isla de Baffin, la bahía de Hudson...

Con la llegada del Cuaternario, cuyo comienzo se sitúa en torno a los 2,59 millones de años y su duración se extiende hasta hoy en día, se han producido una serie de sucesiones cíclicas de periodos glaciares e interglaciares.

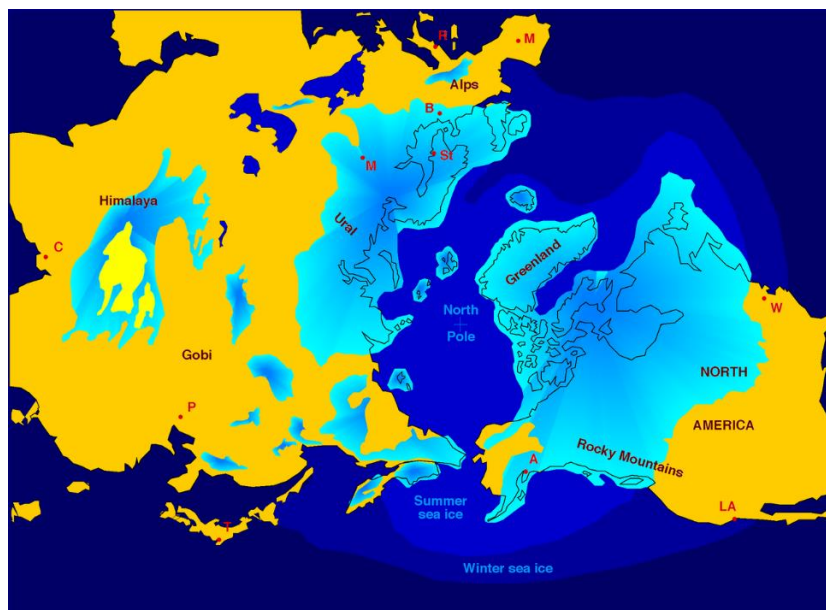


Figura 6. Imagen de la extensión de los casquetes Laurentino y Fenoescandinavo. Fuente: Wikipedia.

El Cuaternario cuenta con mayor información, ya que es la más reciente en el tiempo y la mejor conservada. A continuación, se va a tratar acerca de los periodos glaciares del Cuaternario que promovieron un aumento notable en la extensión y espesor de estos. Primeramente, en cuanto a la Antártida, según las medidas realizadas, a través de dataciones radiométricas, se constata que la zona más oriental sufrió una serie de fluctuaciones. El campo de hielo Laurentino llegó a alcanzar entre 18-35 millones de km³, siendo uno de los glaciares más grandes de los que se tiene constancia de cualquier glaciación. Mientras que el Fenoescandinavo cubrió 1.5 millones de km², alterando el drenaje de los ríos de Europa Central, además se piensa que Siberia conectaba con Alaska a través del estrecho de Bering, el cual se encontraría congelado.

En la época del Pleistoceno, entre los 2,59 millones de años hasta el 10.000 a. C., las montañas mediterráneas alcanzan su mayor extensión y, además, algunas de las formas de relieve glacial más claras son en el Último Máximo Glacial (UMG), hace alrededor de 20.000 años. Aunque en algunas zonas se produjo un retroceso, sobre todo en las áridas, esto se piensa que es debido a la reducción de lluvias y a la alteración del clima regional, que genera el desarrollo de los campos de hielo.

El estadio o intervalo frío *Younger Dryas*, experimentado hace 11.000 - 10.000 años, supuso una bajada rápida y brusca de las temperaturas, lo que terminó desencadenando en un reavance de los glaciares, tras la Oscilación de *Allerød*, que produjo un clima templado. De forma que durante el *Younger Dryas*, los glaciares volvieron a ocupar su antigua localización durante el UMG. Este estadio afectó sobre todo a la región del Atlántico norte. Posteriormente este estadio es sucedido por un retroceso de los casquetes Laurentino y Fenoescandinavo, debido a la suma de varios factores, por ejemplo, la regresión del mencionado casquete Laurentino fue debido al aumento de cuerpos de agua en los márgenes de los campos de hielo, mientras que las causas del retroceso del Fenoescandinavo fueron el incremento del nivel del mar y la presencia de grandes lagos proglaciares. A continuación, para poder comprender mejor lo expuesto anteriormente, se muestra una tabla en la que figura las diferentes temperaturas de la Tierra, a lo largo de su historia geológica.

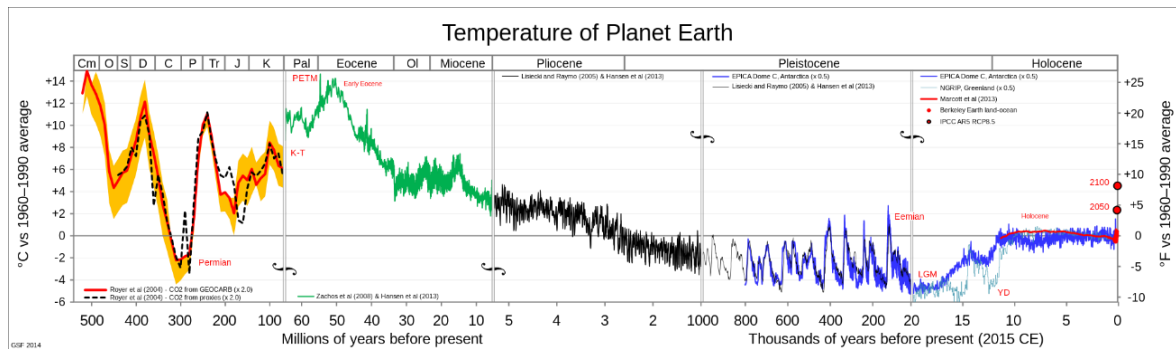


Figura 7. Temperatura del planeta Tierra desde el Fanerozoico hasta el Holoceno.

Fuente: Wikipedia.

El Holoceno es la siguiente época geológica, cuyo origen se sitúa en torno a los 11.700 años hasta el presente (aunque algunos científicos han propuesto sustituir este término por Antropoceno, para referirse a esta época, ya que se encuentra marcada principalmente por los efectos negativos del ser humano que han modificado el ecosistema terrestre). Dentro del Holoceno, se ha de destacar la edad o piso más importante y reciente que ha supuesto un notable aumento en cuanto a volumen y tamaño de los glaciares, es decir la Pequeña Edad del Hielo (PEH), también conocida en inglés como *Little Ice Age* (LIA).

La Pequeña Edad del Hielo, como anteriormente se ha mencionado, es un claro ejemplo del efecto de la actividad volcánica a los que se suman los mínimos de actividad solar. Se caracteriza por una bajada de temperaturas y un aumento de las lluvias, de forma que la temperatura media anual se redujo hasta alcanzar tan sólo 1° C. La consideración del inicio de la PEH difiere según los autores, ya que algunos proponen diferentes fechas, aunque el periodo más consensuado y tradicional lo data entre 1550 y 1850.

Todos estos factores provocaron un avance de los glaciares de varios kilómetros, tanto en altas latitudes como altitudes, por lo tanto, la mayoría de los glaciares o parches de hielo de hoy en día, que quedan en la región mediterránea, son vestigios de esta edad o piso. Un caso concreto sería la extensión de los glaciares en la región de los Pirineos, la cual durante esta edad fue la más extensa, llegando a alcanzar dimensiones de hasta 2,36 km², contando por lo tanto con 115 glaciares (Hughes, 2014). A continuación, se ha adjuntado un gráfico que muestra el promedio de las temperaturas de la Tierra, a lo largo de los años, partiendo desde el año 0 hasta el 2000-2020. En azul se remarca la LIA, que como

bien se observa y se ha mencionado, durante la cual se produce una bajada de temperaturas, precedida del periodo medieval cálido.

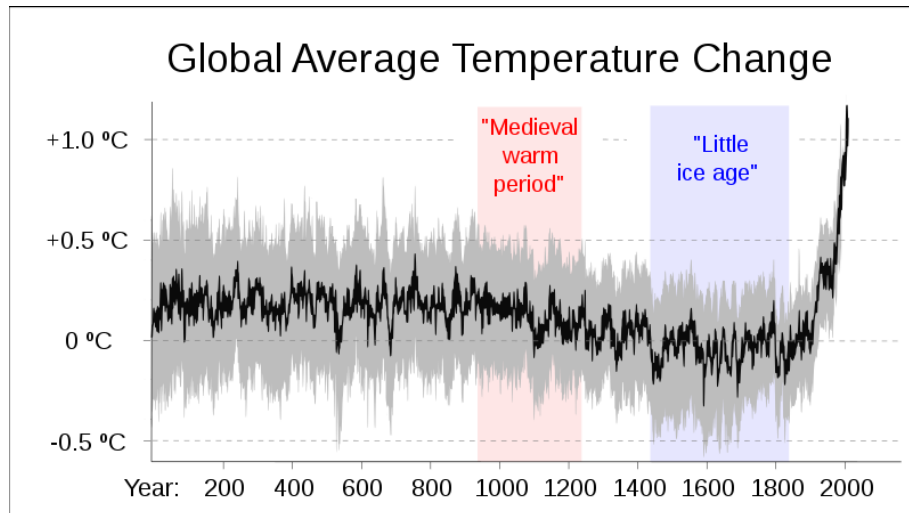


Figura 8. Temperatura del planeta Tierra durante el Holoceno. Fuente: Wikipedia.

4.2 Técnicas de estudio

Los glaciares pueden ser estudiados desde distintas disciplinas, en el siguiente trabajo se destacan:

- Fotografías aéreas: son una rica fuente de información para estudiar la evolución de los glaciares, de manera gráfica. Se encuentra totalmente relacionado con la teledetección, comentada a continuación.
- La teledetección o conocido en inglés como *remote sensing*: es la observación remota de la superficie terrestre (Chuvieco, 2019). En cuanto a los glaciares esta permite obtener la extracción de una gran variedad de parámetros relacionados como: el albedo, el área glaciar, la línea de equilibrio, el espesor y volumen glaciar, el balance de masa...

El Índice Diferencial Normalizado de Nieve o más conocido por sus siglas en inglés NDSI (*Normalized Differential Snow Index*) posibilita cartografiar la nieve. Es una medida que diferencia entre el rango visible del espectro (verde) y el infrarrojo de onda corta (SWIR). La fórmula es:

$$\text{NDSI} = (\text{Bandas TM 2} - \text{Bandas TM 5}) / (\text{Bandas TM 2} + \text{Bandas TM 5})$$

A continuación, se adjunta la firma espectral que dibujan en general los glaciares, la cual varía según el estado de la nieve, ya que si es fresca tendrá mayor reflectancia a diferencia de un glaciar rocoso o “sucio”.

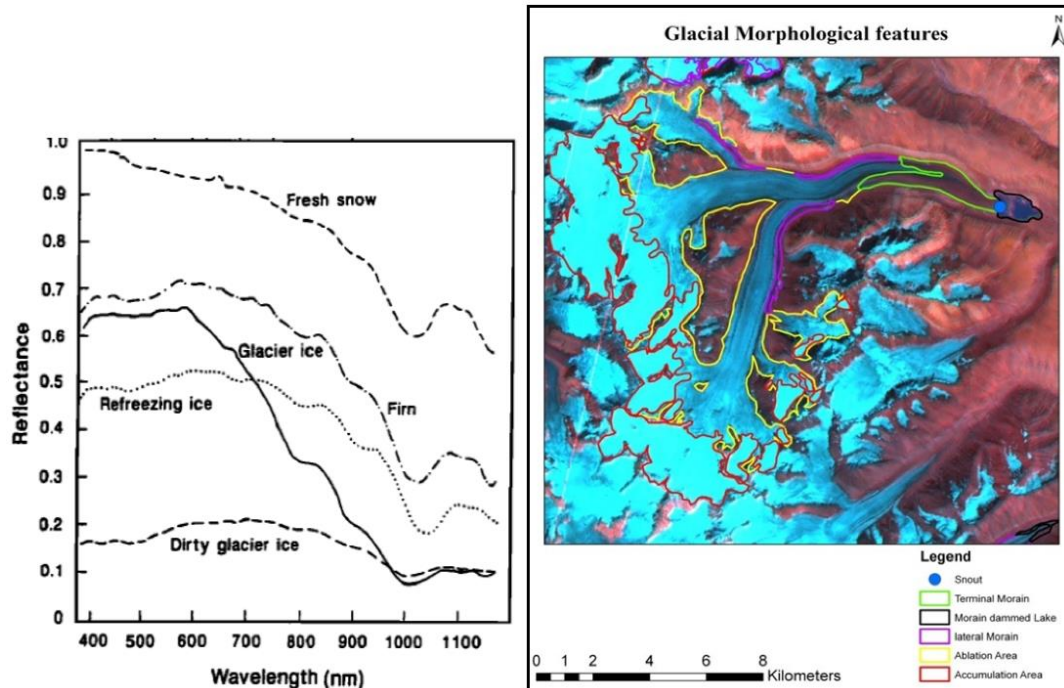


Figura 9. Curvas de reflectancia espectral para nieve y hielo en diferentes etapas de formación e imagen satelital. Fuente: Pandey, P. et al (2015).

- Mediciones de espesor de hielo con Georadar: se trata de un sistema no destructivo, basado en análisis de las capas de hielo. El Georadar o GPR (Ground Penetrating Radar) se fundamenta, como dice su nombre, en el método radar (Radio Detection and Raging) de forma que sondea la parte externa de la superficie del subsuelo, mediante la emisión y recepción de ondas electromagnéticas. De todos los materiales geológicos de la Tierra, el hielo glaciar es el más propicio para ser explorado por métodos electromagnéticos (Watts y England, 1976).
- Mediciones directas del balance de masa mediante balizas de ablación: este procedimiento permite obtener el cálculo del balance de masa del glaciar, a través de la instalación de las mencionadas balizas en pozos, y en diferentes puntos de altitud, que permiten medir tanto la pérdida como la ganancia de masa del glaciar, anualmente.

- Las dataciones absolutas:
 - Como los métodos radiométricos, de los cuales la más usada son el estudio de las variaciones del radiocarbono o carbono -14 (C^{14}). Los seres vivos están compuestos por este isótopo y puede llegar a mantenerse dentro del cuerpo hasta los 50.000 años, por lo tanto, es uno de los métodos más fiables. A pesar, de ello la composición del carbono 14 se reduce de manera exponencial una vez que se ha producido la muerte del organismo; es decir a partir de los 5.730 años este isótopo puede llegar a quedarse disminuido hasta la mitad.
 - Los métodos incrementales como la dendrocronología o la liquenometría. El primer proceso de medición se basa en la datación a partir de los anillos de crecimiento que presentan las especies arbóreas y arbustivas de tipo leñoso. La liquenometría en cambio permite realizar las dataciones gracias al crecimiento del líquen para establecer la edad que tiene una superficie rocosa, como los de origen glaciario: depósitos de tills, morrenas....

5. Resultados

A continuación se expondrán una serie de mapas realizados a través de Google Earth y, posteriormente, tratados en ArcMap versión 10.7.1, en ellos se reflejan los glaciares y heleros seleccionados y sus correspondientes morrenas y ELA's, que se localizan en el entorno de la cuenca del Mediterráneo, para poder establecer una comparación entre el pasado y su situación presente.

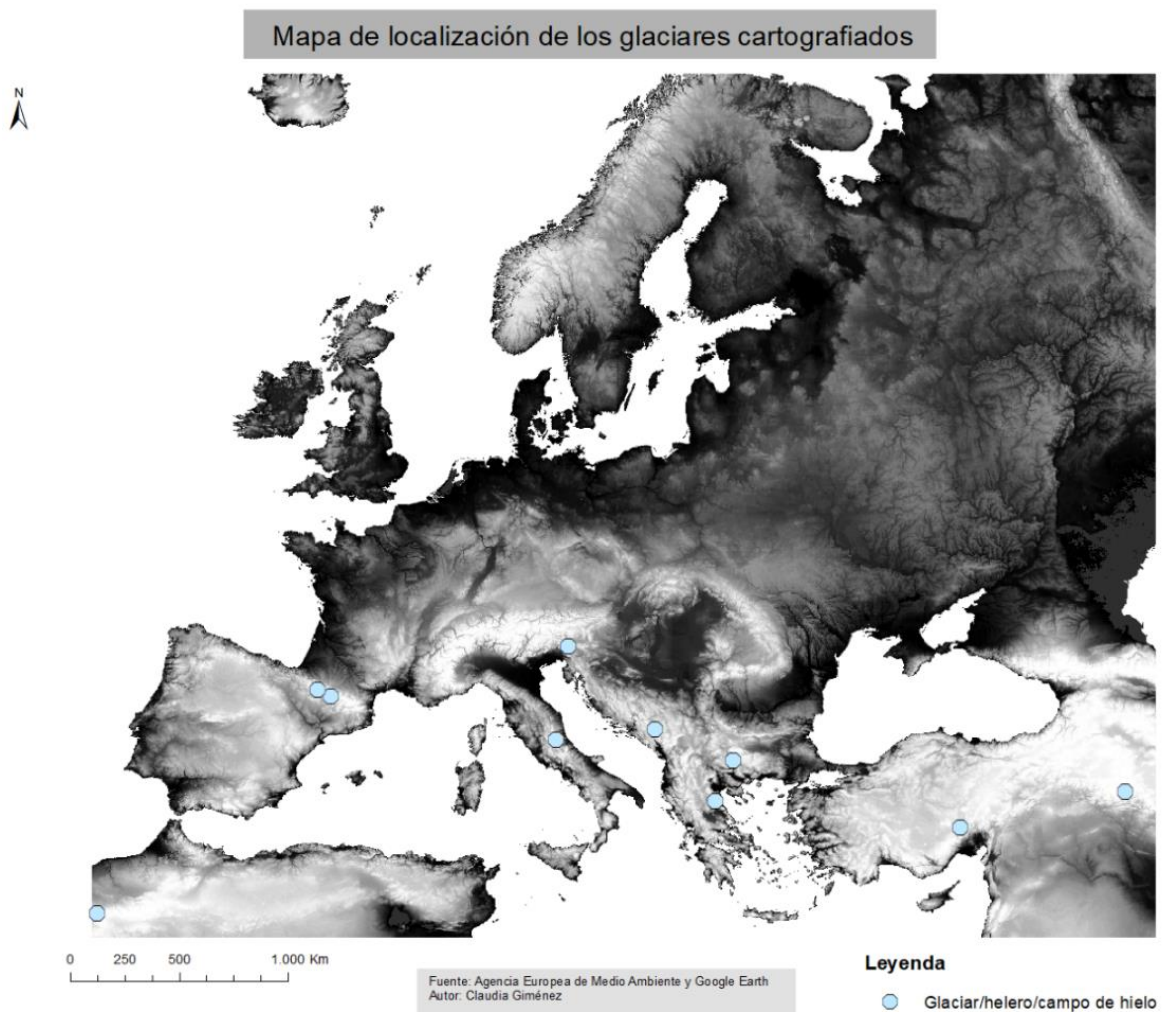


Figura 10. Mapa de localización de los glaciares cartografiados. Elaboración propia.

5.1 Glaciares de Aneto y Maladeta:

- Localización: Pirineo central (España). Coordenadas: 42° 38' 19.29" N 0° 38' 51.29" E.
- Picos cercanos y alturas: Aneto (3.404 m.s.n.m.), Maldito (3.354 m.s.n.m.) y Maladeta (3.308 m).
- Altura a la que se encuentra, área actual, tipología: la altura que alcanzan ambos es en torno a los 2.990-3.100 m. El área actual del glaciar del Aneto es de 61,1 hectáreas (ha) y el de la Maladeta es de 18,3 ha. Ambos presentan la tipología de glaciar.

- Altura de la ELA mediante el software Pellitero et al. (2015): en el Aneto es de 3.123 m.s.n.m. y el de la Maladeta de 3089 m.s.n.m.
- Área aproximada que alcanzó durante la PEH: en el caso del Aneto es 261,6 ha (Chueca, 2000) y en la Maladeta es 121,3 ha (Chueca, 2000). La disminución más notable se ha producido en el glaciar de la Maladeta, reduciendo su superficie más de 6 veces, a diferencia del Aneto que se ha mermado en torno a 4 veces su área.
- Máxima altitud alcanzada por las morrenas laterales de la PEH, por lo que la ELA podía estar: en el caso del Aneto en torno a 3.080 m.s.n.m. por lo que ha ascendido 43 m.s.n.m. Y en cuanto a la Maladeta la morrena lateral más alta alcanza 2.940 m, incrementando hasta 149 m.s.n.m.

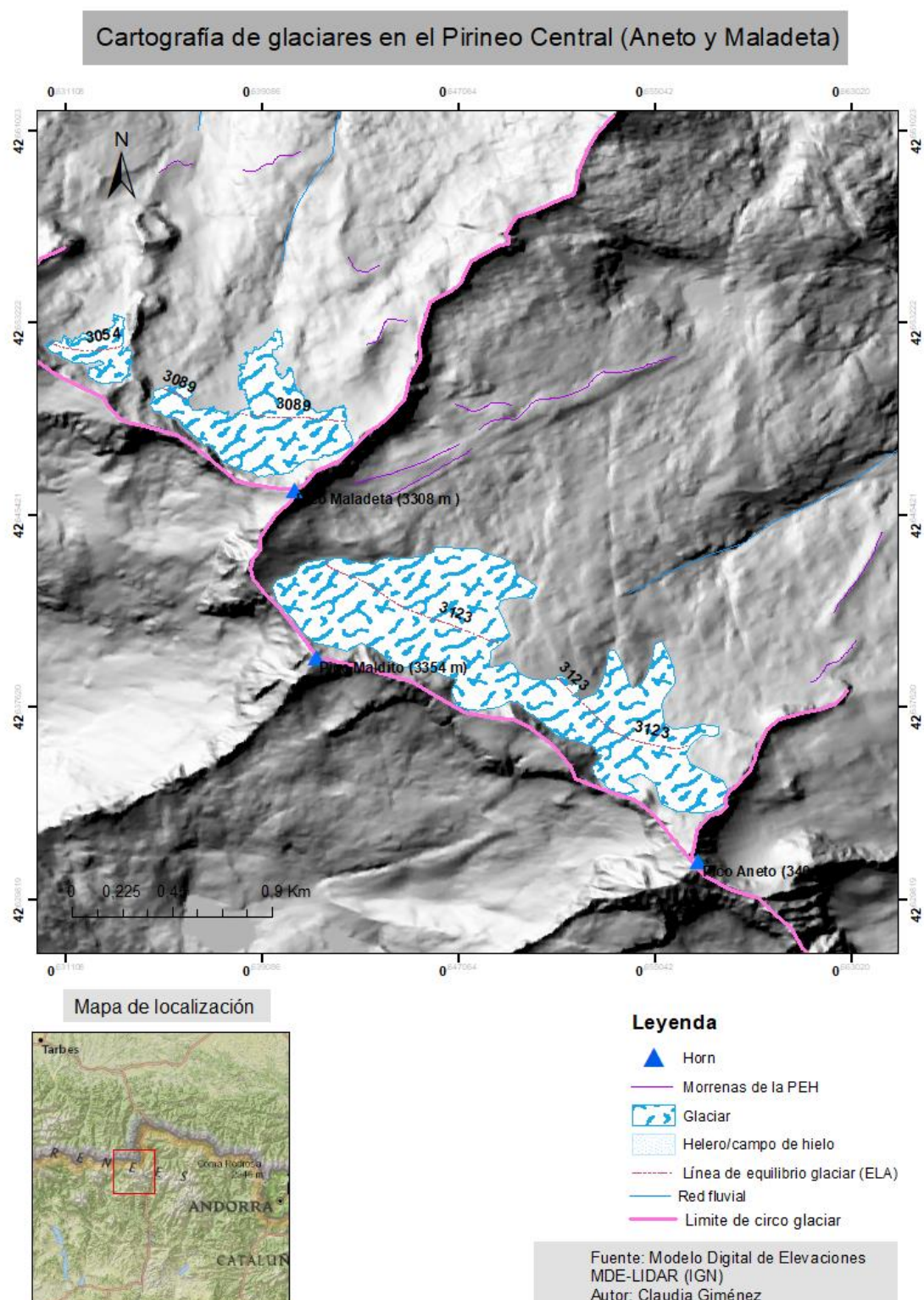


Figura 11. Cartografía geomorfológica del Aneto y Maladeta (España) y sus ELA's.

Elaboración propia.

5.2 Glaciar de Ossue:

- Localización: Pirineo francés. Coordenadas: 42°46'15.0" N 0°08'19.9" O.
- Picos cercanos y alturas: Viñamala (3.299 m.s.n.m.) y Cerbillona (3.248 m.s.n.m.)
- Altura a la que se encuentra, área actual, tipología: en torno a 3.180-2.800 m, el área es de 33,16 ha y es un glaciar.
- Altura de la ELA mediante el software Pellitero et al. (2015): 3076 m.s.n.m.
- Área aproximada que alcanzó durante la PEH: en cuanto al conjunto de Viñamala fue en torno a 40,9 (Chueca, 2002) y/o 38 (Hughes, 2014). La disminución no ha sido tan notable con el caso anterior, reduciendo su superficie alrededor de 1 o 2%.
- Máxima altitud alcanzada por las morrenas laterales de la PEH, por lo que la ELA podía estar: 2.700 m.s.n.m., ascendiendo 376 m.s.n.m.

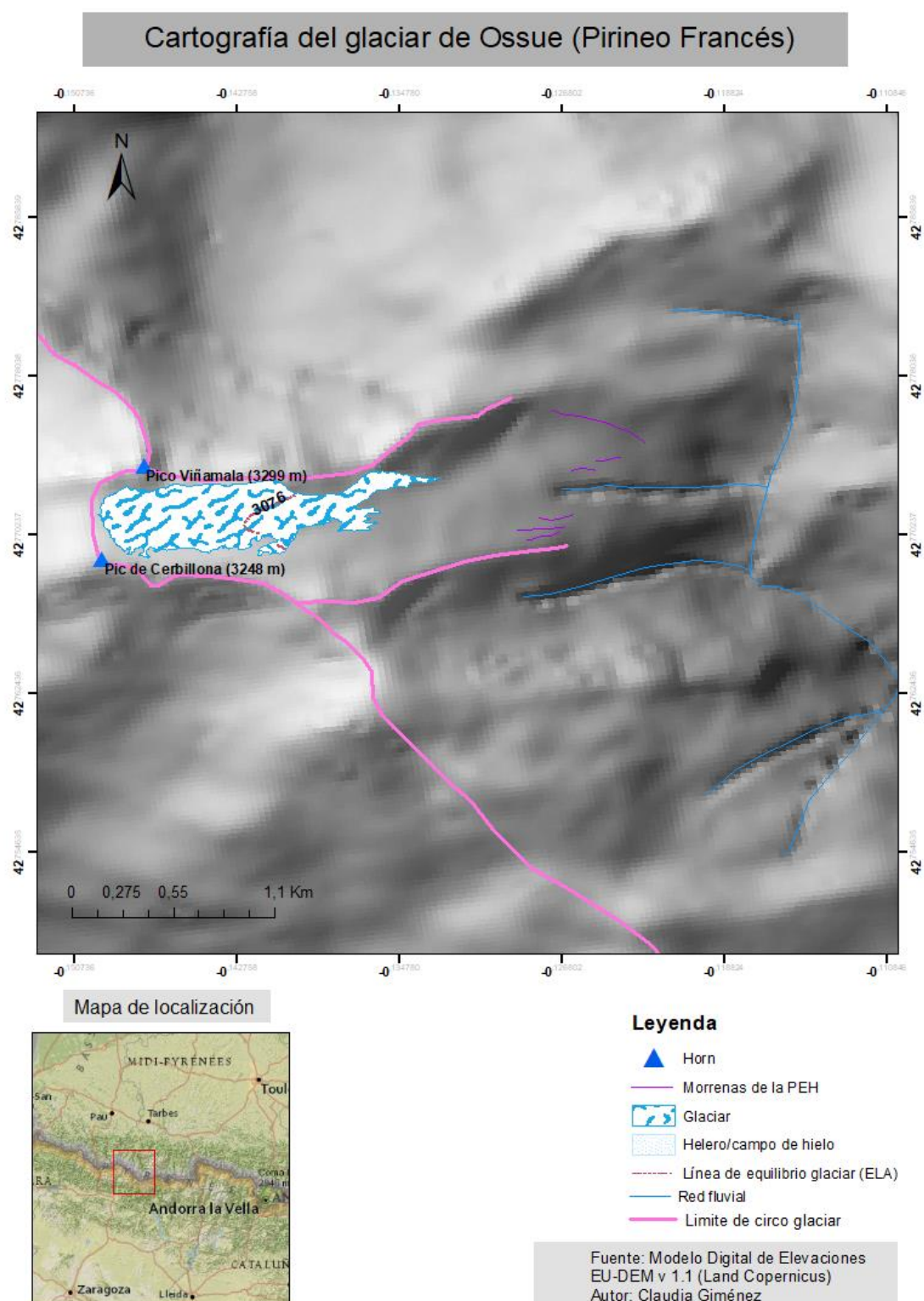


Figura 12. Cartografía geomorfológica del glaciar de Ossue (Francia) y su ELA. Elaboración propia.

5.3 Antiguo glaciar Ghiacciato del Calderone:

- Localización: macizo del Gran Sasso, en los Apeninos (Italia). Coordenadas: 42°28'00" N 13°33'00" E.
- Picos cercanos y alturas: Corno Grande-Vetta Occidentale (2.912 m.s.n.m.) y Corno Grande-Vetta Orientale (2.903 m.s.n.m.)
- Altura a la que se encuentra, área actual, tipología: 2.780-2.680 m.s.n.m. Las dos masas heladas ocupan 4,7 ha y son heleros, al no mostrar signos de dinamismo.
- Altura de la ELA mediante el software Pellitero et al. (2015): en el helero más grande es en torno a 2.728 m.s.n.m., mientras que el más pequeño localizado al oeste es de 2.809 m.s.n.m.
- Área aproximada que alcanzó durante la PEH: 10,42 (Doreffice et al. 2000), de forma que se ha perdido más de la mitad de la masa de este antiguo glaciar. Entre 1916-1990 se redujo su volumen en un 90% y su área en un 68%, encontrándose por debajo de la línea de nieve regional en un circo inclinado orientado al norte. El Ghiacciato del Calderone se dividió en el año 2009 en dos pequeños parches glaciares o glaciarets, pero había sido considerado hasta 2011 uno de los glaciares más meridionales de Europa.
- Máxima altitud alcanzada por las morrenas laterales de la PEH, por lo que la ELA podía estar: 2.670 m.s.n.m., de forma que se ha incrementado su altura en torno a 139 m.s.n.m.

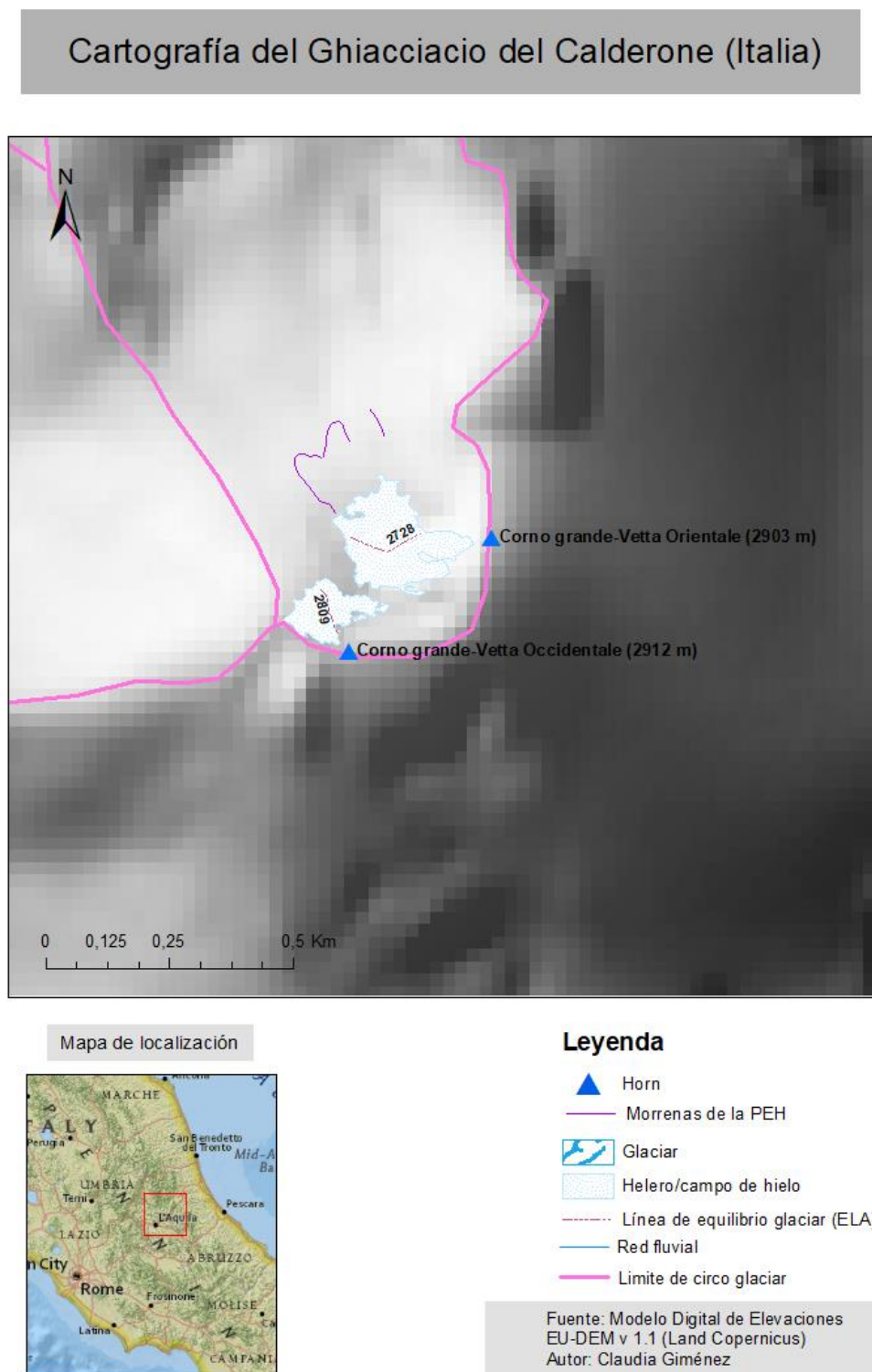


Figura 13. Cartografía geomorfológica del Ghiacciaio del Calderone (Italia) y su ELA.
Elaboración propia.

5.4 El extinto glaciar Zeleni Sneg:

- Localización: los Alpes, en la zona sudeste (Eslovenia). Coordenadas: 46° 22' 51.70" N 13° 50' 22.56" E.
- Picos cercanos y alturas: el pico Triglav (2.864 m.s.n.m.)
- Altura a la que se encuentra, área actual, tipología: debido a su reciente desaparición, carecemos de este dato. Se localizaba en torno a los 2.340 m.s.n.m.
- Altura de la ELA mediante el software Pellitero et al. (2015): debido a su reciente desaparición, carecemos de este dato.
- Área aproximada que alcanzó durante la PEH: Del Gobbo et al. (2013) afirma que este glaciar durante la LIA llegó a alcanzar 40 ha, mientras que en 2013 sólo medía entre 2 o 3 m, con unos máximos de 5 m, momento en el que incluso ya se llegaba a distinguir el lecho rocoso, motivo por el cual se considera ya extinto.
- Máxima altitud alcanzada por las morrenas laterales de la PEH, por lo que la ELA podía estar: debido a su reciente desaparición, carecemos de este dato.

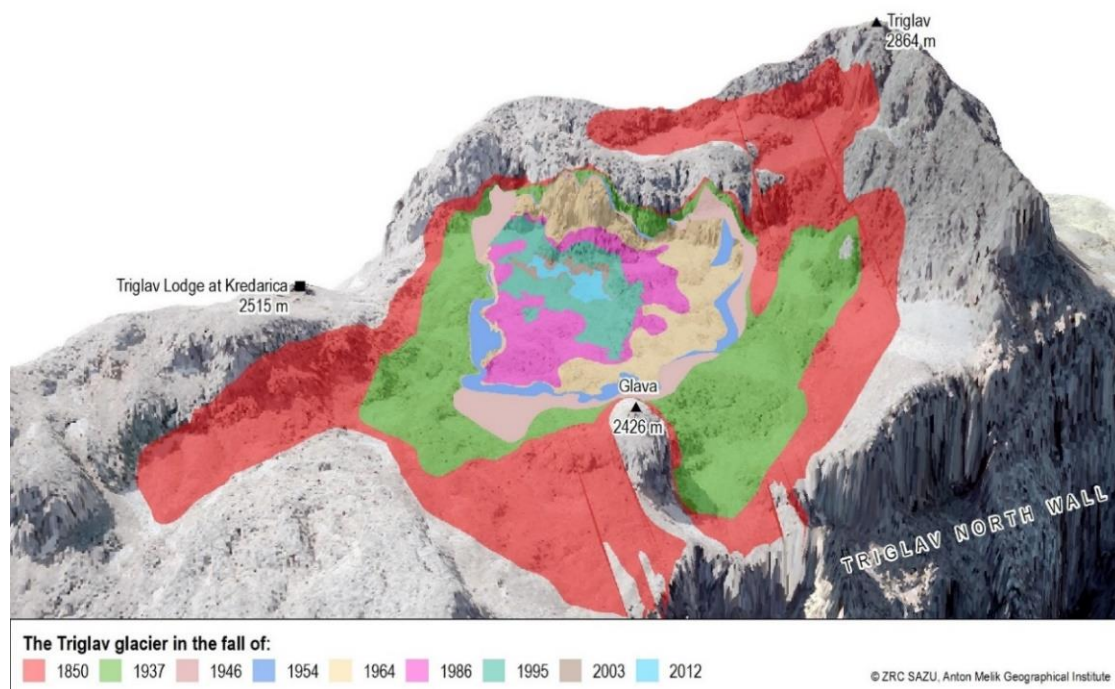


Figura 14. Cartografía 3D del glaciar de Triglav a lo largo de los años (1850 hasta 2012).

Fuente: Anton Malik Geographical Institute, ZRC SAZU 2019.

Además, si observamos la siguiente imagen adjunta, procedente de Google Earth, capturada en septiembre del año 2018, se percibe como el antiguo glaciar *Zeleni Sneg* podría considerarse extinto o, por lo menos, fragmentado en heleros diseminados.

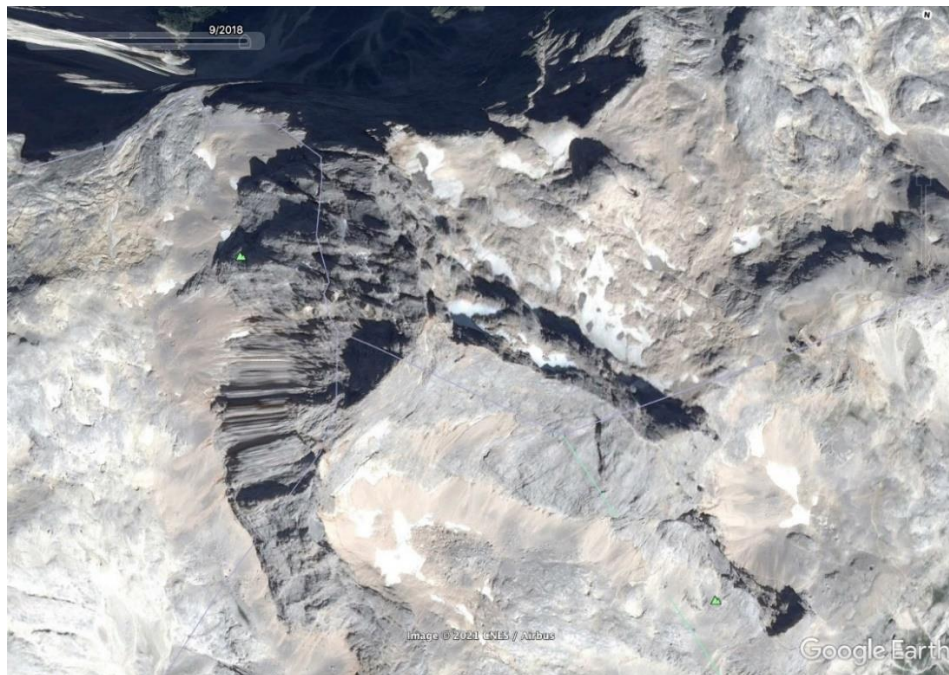


Figura 15. Captura de pantalla de la zona del glaciar de Triglav 2018 de Google Earth. Fuente: Google Earth.

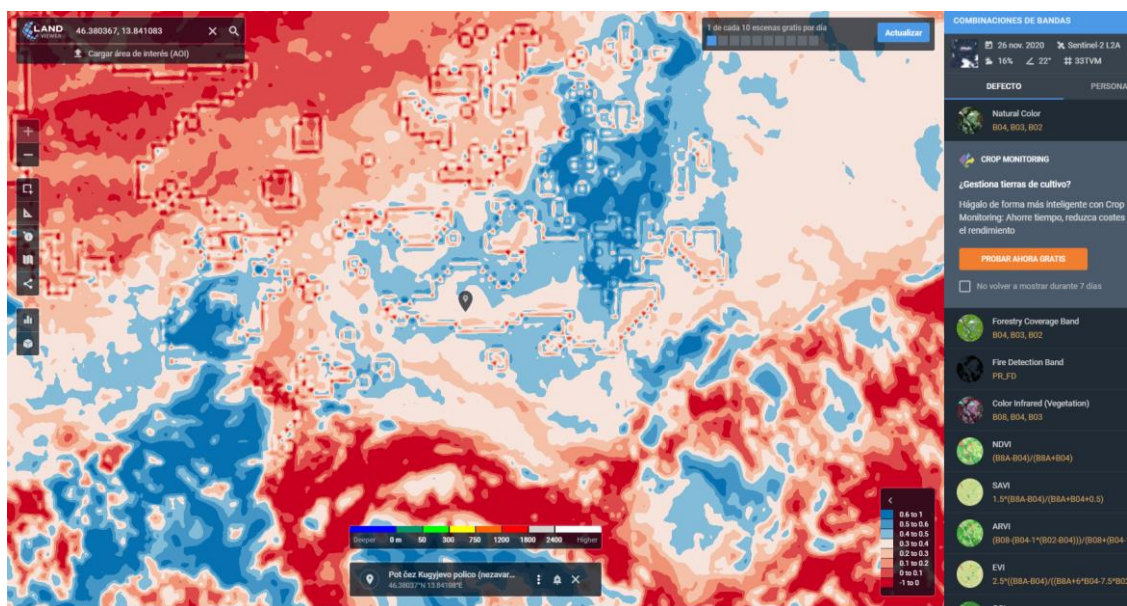


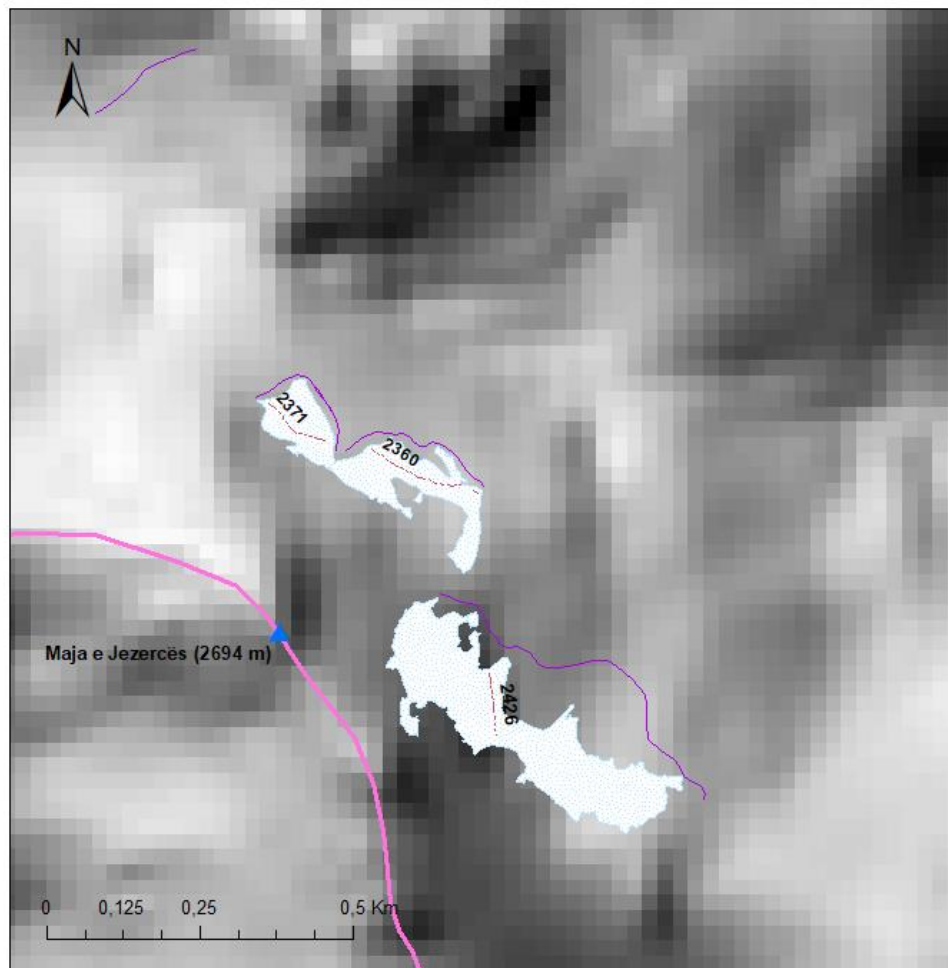
Figura 16. Captura de pantalla de la aplicación Land Viewer. Fuente: Land Viewer

Para corroborar la situación de Triglav, se puede comprobar en la combinación de bandas espectrales el NDSI extraído de Land Viewer, apreciando que, el 26 de noviembre de 2020, la zona correspondiente a la ubicación de este glaciar posee una componente muy baja en cuanto a hielo/nieve, codificada con colores blancos.

5.5 Helero I, II y III del Maja Jezercë:

- Localización: en la península balcánica, en los Alpes Dináricos (Albania).
Coordenadas: 42° 26' 37.75" N 19° 48' 55.52" E.
- Picos cercanos y alturas: pico Maja Jezercë (2.694 m.s.n.m.).
- Altura a la que se encuentra, área actual, tipología: alrededor de los 2320-2.400 m.s.n.m. El área del Maja Jezercë I es de 1,01 ha, el del Maja Jezercë II es de 1,78 ha y el del Maja Jezercë III es de 5,52. Los tres son heleros.
- Altura de la ELA mediante el software Pellitero et al. (2015): en cuanto al Maja Jezercë I y II es de 2.371 m.s.n.m. y del Maja Jezercë III es de 2.426 m.s.n.m.
- Área aproximada que alcanzó durante la PEH: Maja Jezercë I en torno a 2,3 ha, el Maja Jezercë II en torno a 3,9 ha y el del Maja Jezercë III en torno a 13,8. Por lo tanto, el que más ha perdido en cuanto a superficie ha sido el III, a diferencia del I, siendo en ambos casos más de la mitad de hectáreas.
- Máxima altitud alcanzada por las morrenas laterales de la PEH, por lo que la ELA podía estar: en este caso, al carecer de morrenas laterales, se ha realizado con las terminales, de forma que en el Maja Jezercë I y II la morrena terminal más alta se localiza a 2.360 m.s.n.m., por lo que ha incrementado en 11 m.s.n.m. su altura. En el Maja Jezercë III la morrena final se encuentra en torno a 2.362 m, por lo que ha ascendido 55 metros.

Cartografía del Maja Jezercë I, II y III (Albania)



Mapa de localización



Leyenda

- ▲ Horn
- Morrenas de la PEH
- Glaciar
- Helero/campo de hielo
- Línea de equilibrio glaciar (ELA)
- Red fluvial
- Limite de circo glaciar

Fuente: Modelo Digital de Elevaciones
EU-DEM v 1.1 (Land Copernicus)
Autor: Claudia Giménez

Figura 17. Cartografía geomorfológica del Maja Jezercë I, Maja Jezercë II y Maja Jezercë III y sus ELA's (Albania).

5.6 Glaciar Debeli Namet:

- Localización: en los Balcanes, en el macizo Durmitor (Montenegro).
Coordenadas: 43°06'57" N 19°04'00" E.
- Picos cercanos y alturas: Bobotov Kuk (2.523 m.s.n.m.) y Vrh Slejmena (2.455 m.s.n.m.).
- Altura a la que se encuentra, área actual, tipología: en torno 2385-2088 m.s.n.m. El área que presenta actualmente es de 1,96 ha y es un glaciar.
- Altura de la ELA mediante el software Pellitero et al. (2015): 2224 m.s.n.m.
- Área aproximada que alcanzó durante la PEH: 6,29 ha. Por lo tanto, se ha reducido su a más de la mitad. Según los científicos Gachev y Stoyanov (2011) este glaciar ocupaba un área de 2,7 ha (321 m x 136 m) en el año en el que se realizó el estudio.
- Máxima altitud alcanzada por las morrenas laterales de la PEH, por lo que la ELA podía estar: 2.110 m.s.n.m., por lo que ha ascendido en torno a 114 m.s.n.m.

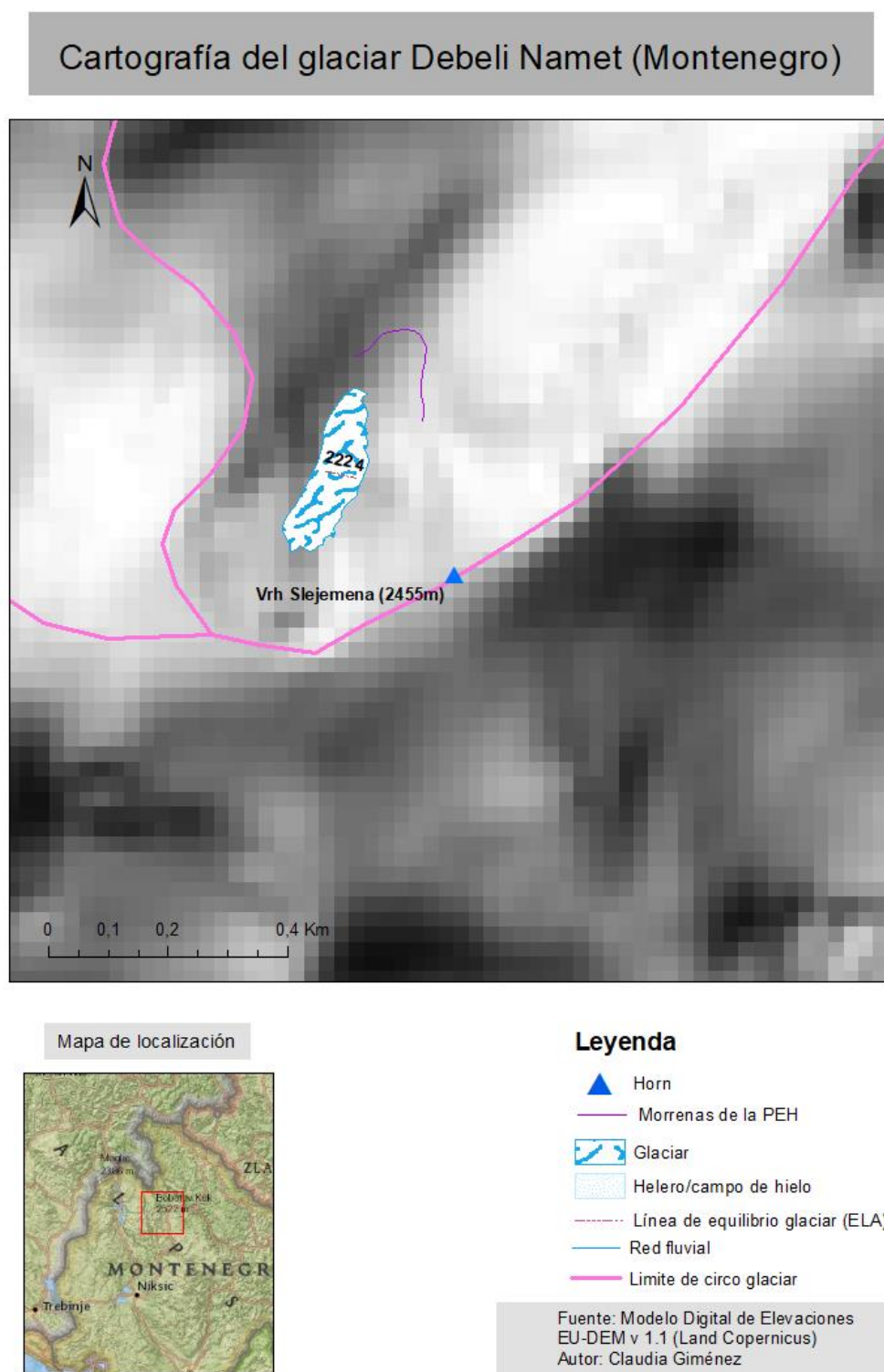


Figura 18. Cartografía geomorfológica del glaciar Debeli Namet (Montenegro) y su ELA.

Elaboración propia.

5.7 El extinto glaciar Maja e Koljaet

- Localización: en los Balcanes, en los Alpes Dináricos (Albania). Coordenadas: 42° 27' 13" N 19° 47' 57" E.
- Picos cercanos y alturas: Maja e Koljaet (2.490 m.s.n.m.).
- Altura a la que se encuentra, área actual, tipología: debido a su reciente desaparición, carecemos de este dato. Se localizaba en torno a 2.390 m.s.n.m.
- Altura de la ELA mediante el software Pellitero et al. (2015): debido a su reciente desaparición, carecemos de este dato.
- Área aproximada que alcanzó durante la PEH: Gahev y Stoyanov (2011) afirmaron que la extensión era de 50 × 100 m y estaba considerado como un glaciaret en el año en el que se realizó el artículo.
- Máxima altitud alcanzada por las morrenas laterales de la PEH, por lo que la ELA podía estar: debido a su reciente desaparición, carecemos de este dato.

Ha ido perdiendo masa de hielo a lo largo de estos años, ya que, en 2018, como bien se puede observar en la imagen de Google Earth adjuntada a continuación, el área donde se encontraba el glaciar estaba cubierta por nieve, dando una falsa sensación de permanencia, la imagen aérea de 2020 evidencia que ya no existe nada más que roquedo al descubierto.



Figura 19. Captura de pantalla de Google Earth del glaciar Maja e Koljaet en 2018.

Fuente: Google Earth.



Figura 20. Captura de pantalla de Google Earth del glaciar Maja e Koljaet en 2020.

Fuente: Google Earth.

La mayoría de los glaciares de los Alpes albaneses estudiados en el siguiente documento se encuentran orientados en dirección nor-noreste, por lo que la localización preferente de estos parches de nieve es en la zona de umbría, alimentados por la nieve que arrastra el viento.

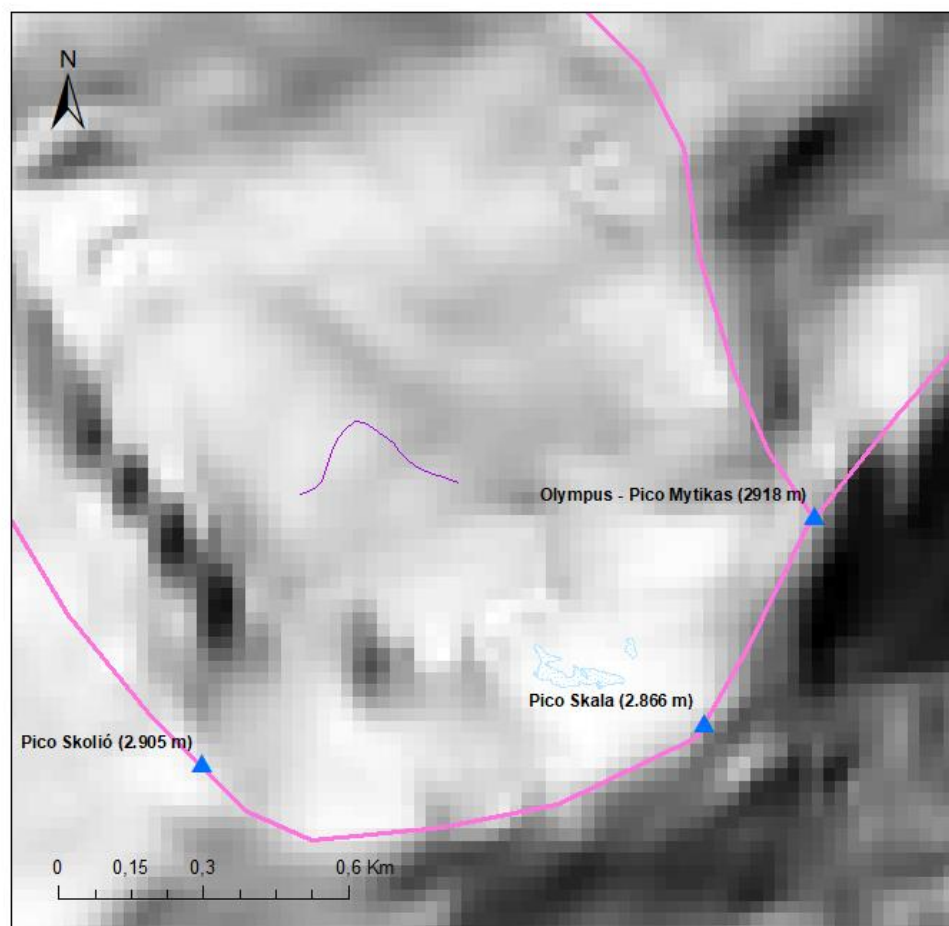
5.8 Campos de hielo en el Olimpo:

- Localización: en el Monte Olimpo (Grecia). Coordenadas: 40° 05' 03.46" N 22° 21' 17.90" E.
- Picos cercanos y alturas: Monte Olimpo (2 918 m.s.n.m.).
- Altura a la que se encuentra, área actual, tipología: en torno a los 2.600 m.s.n.m. El área actual de la masa helada 1 más grande es de 0,55 y la del 2 situado a su derecha es de 0,05. Ambos son campos de hielo.
- Altura de la ELA mediante el software Pellitero et al. (2015): No se ha podido realizar debido a la escasa extensión de los campos de hielo.

- Área aproximada que alcanzó durante la PEH: ambos campos de hielo se encontrarían unidos alcanzando un área de unas 19,2 ha en la PEH, por lo que esta zona es la que más ha perdido en cuanto a extensión.
- Máxima altitud alcanzada por las morrenas laterales de la PEH, por lo que la ELA podía estar: en esta área no encontramos morrenas laterales sino una de tipo frontal que se sitúa a 2.224 metros.

En Grecia ya no se encuentran glaciares, solo hay pequeños campos de hielo en el Monte Olimpo, aunque sea la montaña más alta del país. No obstante, existen evidencias de actividad glacial durante el Holoceno localizadas en el Monte Olimpo, incluso se detectan una serie de morrenas en la cara norte de Megali Kazania (uno de los mayores circos) a una altitud de 2200-2250 m.s.n.m.

Cartografía de los campos de hielo en el Monte Olimpo (Grecia)



Mapa de localización



Leyenda

- Horn
- Morrenas de la PEH
- Glaciar
- Helero/campo de hielo
- Línea de equilibrio glaciar (ELA)
- Red fluvial
- Limite de circo glaciar

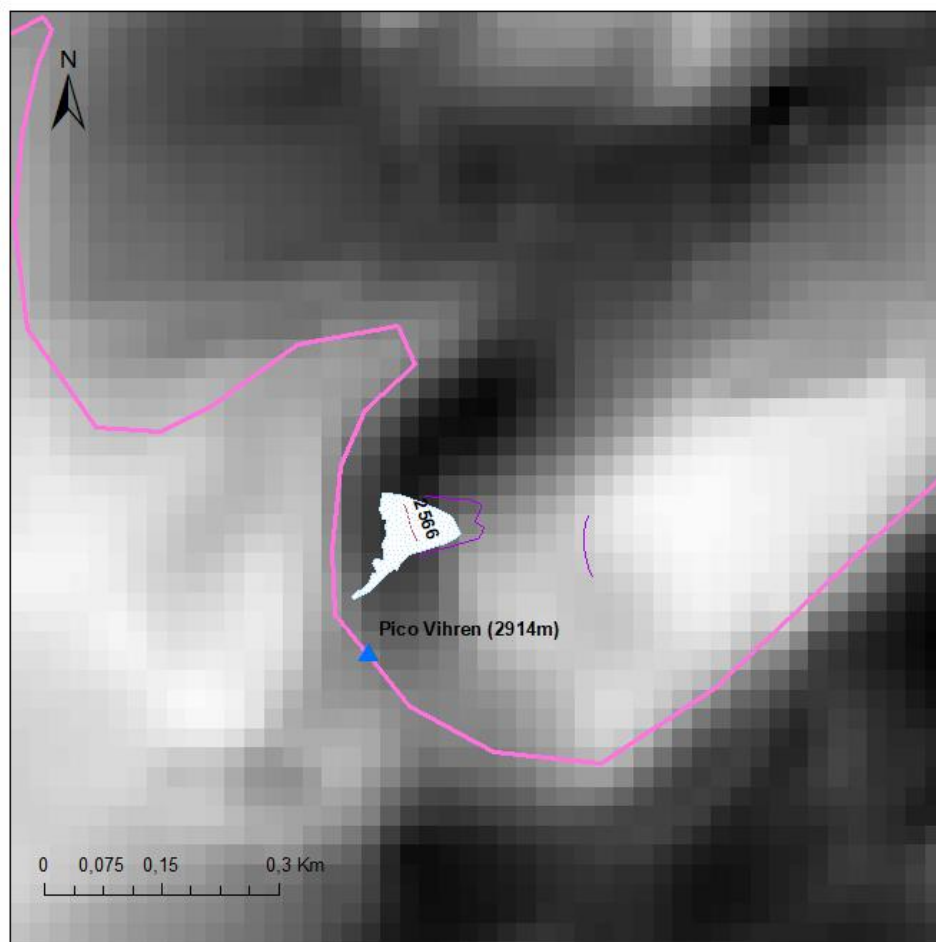
Fuente: Modelo Digital de Elevaciones
EU-DEM v 1.1 (Land Copernicus)
Autor: Claudia Giménez

Figura 21. Cartografía geomorfológica de los dos campos de hielo en el Olimpo (Grecia) y sus ELA's. Elaboración propia.

5.9 Glacieret Snezhnika

- Localización: en los montes Pirin (Bulgaria). Coordenadas: 43° 46' 07.77" N 23° 24' 05.53" E.
- Picos cercanos y alturas: Vihren (2.914 m.s.n.m.)
- Altura a la que se encuentra, área actual, tipología: en torno a 2735-2678 m.s.n.m. El área actual que ocupa es de 0,68 ha y se trata de un helero.
- Altura de la ELA mediante el software Pellitero et al. (2015): 2566 m.s.n.m.
- Área aproximada que alcanzó durante la PEH: 1, 3 ha. Esto significa que ha perdido alrededor de la mitad de su extensión.
- Máxima altitud alcanzada por las morrenas laterales de la PEH, por lo que la ELA podía estar: 2.512 m.s.n.m., por lo que ha ascendido unos 54 m.s.n.m., aproximadamente.

Cartografía del glaciaret Snezhnika (Bulgaria)



Mapa de localización



Leyenda

- ▲ Horn
- Morrenas de la PEH
- Glaciar
- Helero/campo de hielo
- Línea de equilibrio glaciar (ELA)
- Red fluvial
- Limite de circo glaciar

Fuente: Modelo Digital de Elevaciones
EU-DEM v 1.1 (Land Copernicus)
Autor: Claudia Giménez

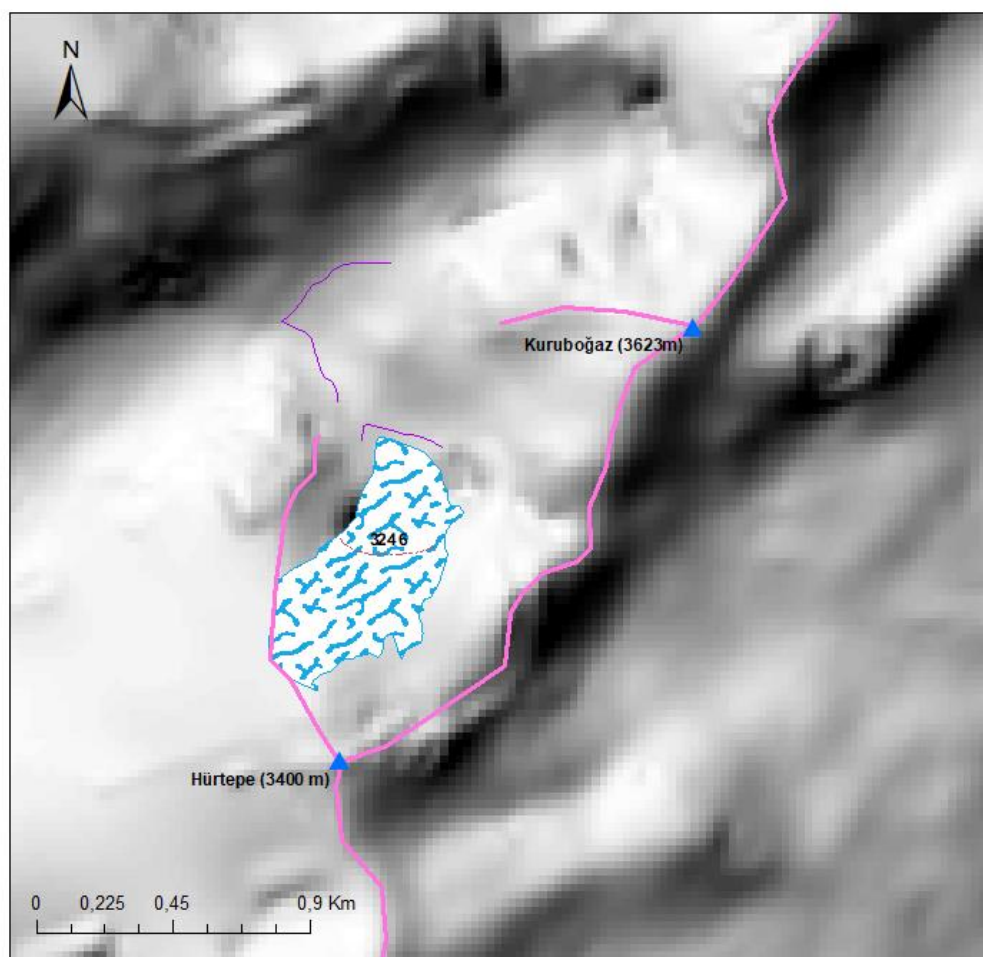
Figura 22. Cartografía geomorfológica del glaciaret Snezhnika (Bulgaria) y su ELA.

Elaboración propia.

5.10 Glaciar en Ala Dagħ

- Localización: al sureste de los montes Tauro, en las montañas Ala Dagħ o Aladağlar, cerca del Parque Nacional Aladağlar o Aladağlar Milli Parkı (Turquía).
Coordenadas: 37° 49' 11.49" N 35° 09' 14.21" E.
- Picos cercanos y alturas: Hürtepe (3.400 m.s.n.m.) y Kuruboğaz (3.623 m.s.n.m.).
- Altura a la que se encuentra, área actual, tipología: en torno a 3.480-3.049 m.s.n.m. El área actual es de 28,27 ha y se trata de un glaciar.
- Altura de la ELA mediante el software Pellitero et al. (2015): 3246 m.s.n.m.
- Área aproximada que alcanzó durante la PEH: 65,6 ha. Al igual que los casos anteriores, este glaciar ha perdido más de la mitad de su masa helada.
- Máxima altitud alcanzada por las morrenas laterales de la PEH, por lo que la ELA podía estar: esta zona carece de morrena lateral, ya que la mayoría son finales y la más alta se localiza a 3.070 m.s.n.m., por lo que ha podido ascender en torno a 176 m.s.n.m.

Cartografía del glaciar en las montañas Ala Dagħ (Turquía)



Mapa de localización



Leyenda

- ▲ Horn
- Morrenas de la PEH
- Glaciar
- Helero/campo de hielo
- Línea de equilibrio glaciar (ELA)
- Red fluvial
- Limite de circo glaciar

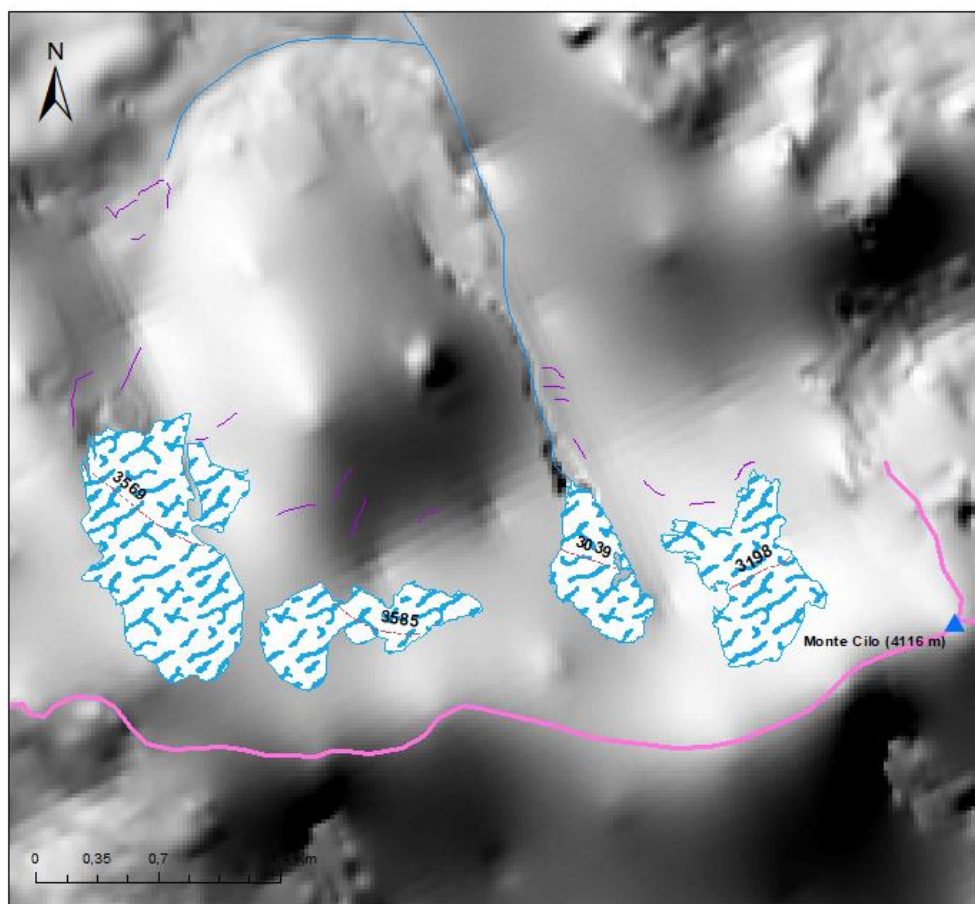
Fuente: Modelo Digital de Elevaciones
EU-DEM v 1.1 (Land Copernicus)
Autor: Claudia Giménez

Figura 23. Cartografía geomorfológica del glaciar cerca del pico Demirkazık en las montañas de Ala Dagħ (Turquía) y su ELA. Elaboración propia.

5.11 Glaciares en el Monte Cilo

- Localización: cerca de la península de Anatolia, al este de los montes Tauro, en la cadena Hakkâri Dağları (Turquía). Coordenadas: 37° 29' 52.52" N 43° 58' 42.03" E.
- Picos cercanos y alturas: monte Cilo o Cilo Dağı (4116 m.s.n.m.).
- Altura a la que se encuentra, área actual, tipología: la altura a la que se localizan estas masas heladas es en torno a los 3.100 m.s.n.m. Si empezamos desde la masa más occidental, es decir la más grande (denominada 1) su área es de 99,21 ha, al este de la anterior se localiza la masa 2 con 37,75 ha, al este de esta se encuentra la masa 3 con un área de 28,89 ha y, por último, la masa más cercana al pico y más oriental es la 4 con 47,95 ha. Todos estos cuerpos son glaciares.
- Altura de la ELA mediante el software Pellitero et al. (2015):
 - Glaciar 1: 3569 m.s.n.m.
 - Glaciar 2: 3.585 m.s.n.m.
 - Glaciar 3: 3.039 m.s.n.m.
 - Glaciar 4: 3.198 m.s.n.m.
- Área aproximada que alcanzó durante la PEH:
 - Glaciar 1: 234,3 ha.
 - Glaciar 2: 95,77 ha.
 - Glaciar 3: 86,62 ha.
 - Glaciar 4: 70,8 ha.
- Máxima altitud alcanzada por las morrenas laterales de la PEH, por lo que la ELA podía estar:
 - Glaciar 1: 3.200 m.s.n.m. es la morrena lateral más alta, por lo que el glaciar ha ascendido 369 m.s.n.m.
 - Glaciar 2: 3.010 m.s.n.m. es la morrena lateral que alcanza mayor altitud, de forma que ha ascendido 575 m.s.n.m.
 - Glaciar 3: 2.985 m.s.n.m. es la altitud que presenta la morrena lateral, por lo que ha ascendido 54 m.s.n.m.
 - Glaciar 4: 3.173 m.s.n.m. es la morrena lateral más alta, siendo el glaciar que menos ha ascendido, tan sólo 25 m.s.n.m.

Cartografía de los glaciares del Monte Cilo (Turquía)



Mapa de localización



Leyenda

- Horn
- Morrenas de la PEH
- Glaciar
- Helero/campo de hielo
- Línea de equilibrio glaciar (ELA)
- Red fluvial
- Límite de circo glaciar

Fuente: Modelo Digital de Elevaciones
EU-DEM v 1.1 (Land Copernicus)
Autor: Claudia Giménez

Figura 24. Cartografía geomorfológica de los cuatro glaciares cerca del Monte Cilo (Turquía) y sus ELA's. Elaboración propia.

5.12 Campos de hielo en Tazaghârt (Alto Atlas)

- Localización: en el alto Atlas (Marruecos). Coordenadas: 31° 04' 00.84" N 7° 27' 35.20" O.
- Picos cercanos y alturas: pico Tazaghârt (3.847 m.s.n.m.).
- Altura a la que se encuentra, área actual, tipología: en torno a los 3.400 m.s.n.m. El área que ocupa el cuerpo 1, siendo el más oriental de los cartografiados es de 0,20 ha, a su izquierda se encuentra el 2 con 0,14 ha de y a la izquierda de este último se localiza el 3 con 0,02. Por último, la masa más alejada y occidental, cercana al brazo izquierdo de la morrena terminal es la 4 con 0,12 ha. Son campos de hielo, denominados como *nevé permanent* en los mapas topográficos marroquíes.
- Altura de la ELA mediante el software Pellitero et al. (2015): no se ha podido realizar, al igual que en el caso de los campos de hielo del Monte Olimpo, al medir menos de media hectárea. Se piensa que, si la precipitación en esta área fuera mayor, la formación de glaciares podría llegar a ser posible. Es probable que durante la PEH se encontrasen glaciares en estas zonas, construyendo morrenas, hasta mediados del siglo XX. La desaparición de estas masas heladas está asociada al aumento de la temperatura del aire de verano, desde 1980.
- Área aproximada que alcanzó durante la PEH: seguramente estos campos de hielo se encontrarían unidos formando única masa de en torno a 20,19 ha.
- Máxima altitud alcanzada por las morrenas laterales de la PEH, por lo que la ELA podía estar: En esta zona encontramos una gran morrena terminal en la cual sus brazos alcanzan más de 3.200 metros de altitud.

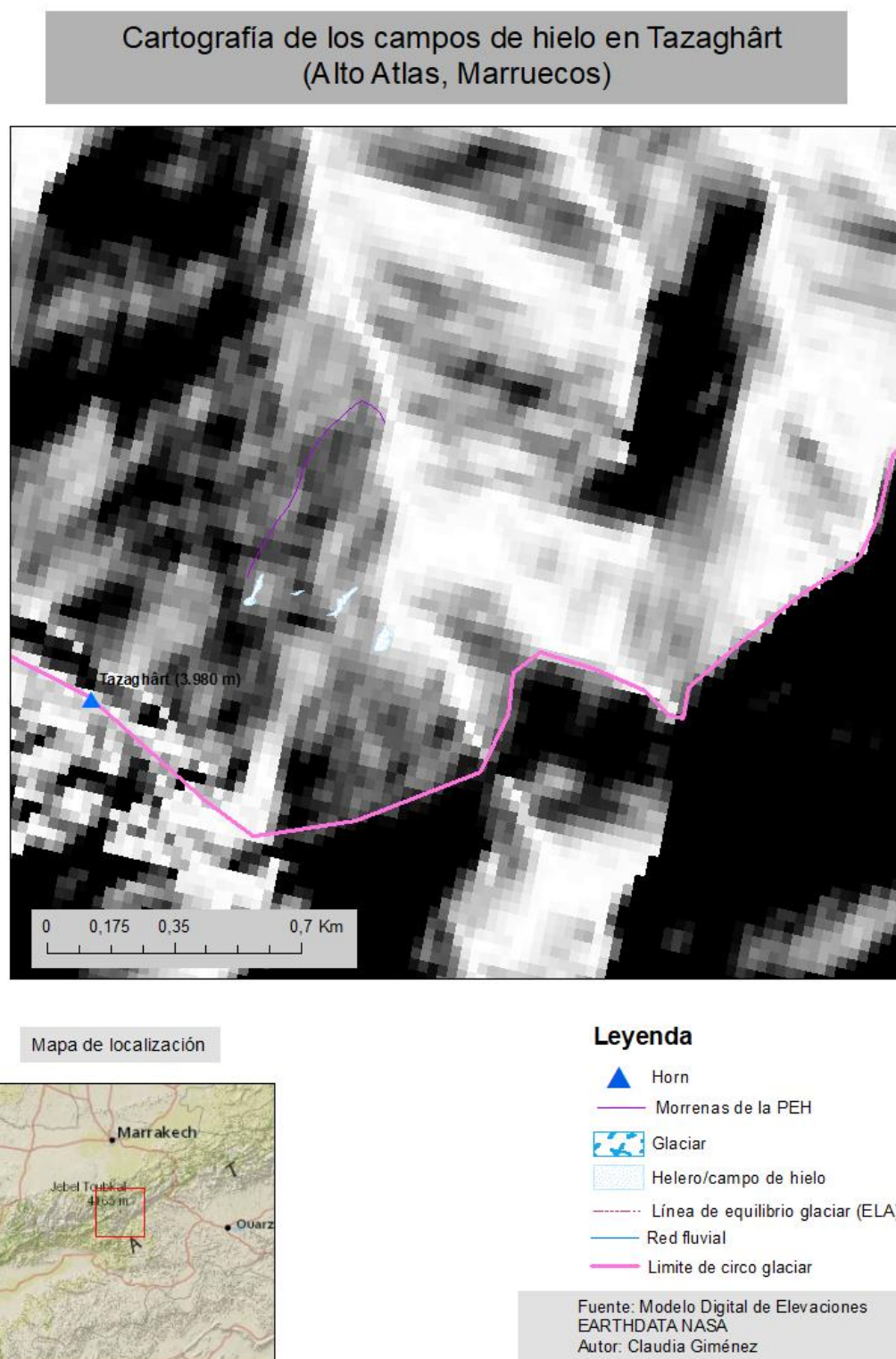


Figura 25. Cartografía geomorfológica de los campos de hielo en Tazaghârt, Alto Atlas (Marruecos) y sus ELA's. Elaboración propia.

En la siguiente tabla se muestran los datos de los glaciares y heleros cartografiados, tanto su localización, coordenadas, tipo (glaciar o helero), altitud, la extensión actual calculada en ArcGIS versión 10.7.1 y la extensión durante la PEH, extraída en algunos casos a partir de artículos científicos, como sucede con los pirenaicos (Aneto, Maladeta y Viñamala) y el antiguo glaciar del Calderone. Mientras que el resto de las masas heladas han sido producto de una aproximación elaborada con el mismo programa, a partir de las morrenas terminales y laterales, reconstruyendo así la posible forma que tuvieron en el pasado.

También, partiendo de los datos aportados por los artículos científicos se ha podido comprobar si la aproximación iba por buen camino, para poder proponer una cierta relación entre la extensión de las masas actuales con las que presentaron durante la PEH; de forma que normalmente el valor de la PEH ha de multiplicar al actual en torno a 2, 3, 4 o, incluso, 6.

Todos aquellos valores indicados con asterisco (*) son los que han sido calculados de manera aproximada con ArcGIS versión 10.7.1.

Nombre	Localización	Coordenadas	Tipo	Altitud	Extensión actual (en hectáreas)	Extensión durante la PEH
Aneto	España (Aragón, Huesca)	42° 38' 25" N 0° 39' 10" E	Glaciar	En torno a 3.280-3.100 m	61,15	261,6 (Chueca, 2002)
Maladeta	España (Aragón, Huesca)	42° 38' 50" N 0° 38' 22" E	Glaciar	En torno a 3.230-2.940 m	18,35	121,3 (Chueca, 2002)
Viñamala	España (Aragón, Huesca)	42° 46' 15.0" N 0° 08' 19.9" O	Glaciar	En torno a 3.180-2.800 m	33,16	40,9 (Chueca, 2002) y 38 (Hughes, 2014)
Ghiacciaccio del Calderone	Italia (Abruzos, provincia de Teramo)	42° 28' 00" N 13° 33' 00" E	Glaciaret	En torno a los 2.780-2.680 m	3,37 + 1,33 = 4,7	10,42 (Doreffice et al. 2000)
Maja e Jezerces 1	Albania	42° 26' 43" N 19° 48' 55" E	Glaciaret	En torno a 2320–2380 m	1,01	2,3*
Maja e Jezerces 2	Albania	42° 26' 40" N 19° 49' 03" E	Glaciaret	En torno a 2320–2410 m	1,78 (El Maja e Jezerce 1 se encontraría fusionado con el 2)	3,9*

Maja e Jezercas 3	Albania	42° 26' 28" N 19° 49' 03" E	Glaciaret	En torno a 2400–2570 m	5,52	13,8*
Debeli Namet	Montenegro	43° 06' 57" N 19° 04' 00" E	Glaciar	En torno 2385- 2088 m	1,96	6,29*
Campo de hielo del Monte Olimpo 1	Grecia (Monte Olimpo, entre Tesalia y Macedonia)	40° 05' 02" N 22° 21' 15.28" E	Campo de hielo	En torno a los 2.630-2.410 m	0,55 (El campo de hielo 1 se encontraría fusionado junto al 2 en la PEH)	19,2*
Campo de hielo del Monte Olimpo 2	Grecia (Monte Olimpo, entre Tesalia y Macedonia)	40° 05' 04" N 22° 21' 18.89" E	Campo de hielo	En torno a 2.568-2.551 m	0,05	19,2*
Snezhnika glaciet	Bulgaria	43° 46' 07.77" N 23° 24' 05.53" E	Glaciaret	En torno a 2735-2678 m	0,68	1,3*
Glaciar en el pico Ala Dag	Turquía	37° 49' 11.49" N 35° 09' 14.21" E	Glaciar	En torno a 3.480-3.049 m	28,27	65,6*

Glaciar en el Monte Cilo 1	Turquía (Monte Cilo)	37° 29' 27" N 43° 59' 42" E	Glaciar	En torno a 3180-3109 m	99,21	234,3*
Glaciar en el Monte Cilo 2	Turquía (Monte Cilo)	37° 29' 59" N 43° 58' 01" E	Glaciar	En torno a 3.200-2.980 m	37,75	95,77*
Glaciar en el Monte Cilo 3	Turquía (Monte Cilo)	37° 29' 44" N 43° 59' 07" E	Glaciar	En torno a 3.055-2.976 m	28,89	86,62*
Glaciar en el Monte Cilo 4	Turquía (Monte Cilo)	37° 30' 07.78" N 43° 57' 34.85" E	Glaciar	En torno a 3.450 -3.070 m	47,95	70,8*
Campo de hielo del Atlas 1	Atlas (Tazaghârt)	31° 04' 01.50" N 7° 57' 36.33" O	Campos de hielo	En torno a 3384 m	0,14 (Los campos del Atlas en Tazaghârt estarían todos juntos en la PEH)	20,19*
Campo de hielo del Atlas 2	Atlas (Tazaghârt)	31° 03' 58.57" N 7° 57' 31.51" O	Campos de hielo	En torno a 3444 m	0,20	20,19*

Campo de hielo del Atlas 3	Atlas (Tazaghârt)	31° 04' 01.30" N 7° 57' 41.07" O	Campos de hielo	En torno a 3411 m	0,02	20,19*
Campo de hielo del Atlas 4	Atlas (Tazaghârt)	31° 03' 59.85" N 7° 57' 45,69" O	Campos de hielo	En torno a 3502 m	0,12	20,19*

Figura 26. Tabla de parámetros de los glaciares estudiados y cartografiados. Elaboración propia

6. El futuro de los glaciares en el entorno de la cuenca del Mediterráneo.

Los glaciares son un patrimonio paisajístico de gran valor y una preciada fuente de información de los cambios climáticos, debido a la dinámica de sus fluctuaciones, creciendo o decreciendo.

Las hipótesis científicas, concretamente las expuestas en la gráfica incluida seguidamente, apuntan hacia una estabilidad de las temperaturas, pero debido a la acción humana y, sobre todo, a la emisión masiva de gases de efecto invernadero, durante estas últimas décadas, se está constatando científicamente la alteración de dicho proceso, provocando un aumento de las temperaturas. Los expertos en climatología plantean dos escenarios posibles:

- Por un lado, la posibilidad de que se produzca un aumento de las temperaturas que provocaría la desaparición de los glaciares, la colonización de la vegetación, tras la formación de nuevos sustratos (aunque se tratarían de una cantidad de especies reducidas adaptadas a la altitud del terreno, la falta de suelos y las fuertes oscilaciones térmicas). Además, el deshielo provocaría la aparición de nuevos lagos.
- O, por el contrario, un improbable periodo de glaciación reinvirtiendo el proceso, que provocaría la bajada de las temperaturas y un aumento de las precipitaciones en forma de nieve, favoreciendo el mantenimiento e incluso la formación de nuevos glaciares. Pero dicho escenario no es proyectado por ningún modelo climático.

Según el IPCC (2013) el retroceso glaciario en la zona del Mediterráneo ha avanzado entre los años 1971-2009, debido a la elevación de las temperaturas de verano y primavera. Además, Giorgi y Lionello (2008) sugieren que para el periodo 2071-2100 se producirán inviernos más secos en el área del sur del Mediterráneo, mientras que al norte serán más húmedos. Sus mapas de predicción de las precipitaciones invernales estiman que los glaciares menos afectados por el cambio climático serán los ubicados en: los Pirineos, los Alpes Marítimos, Eslovenia y en el noreste de Turquía, a diferencia de los Apeninos, Montenegro, Albania, Bulgaria y sureste Turquía, experimentando los efectos negativos derivados de temperaturas más altas en verano y una menor precipitación en invierno.

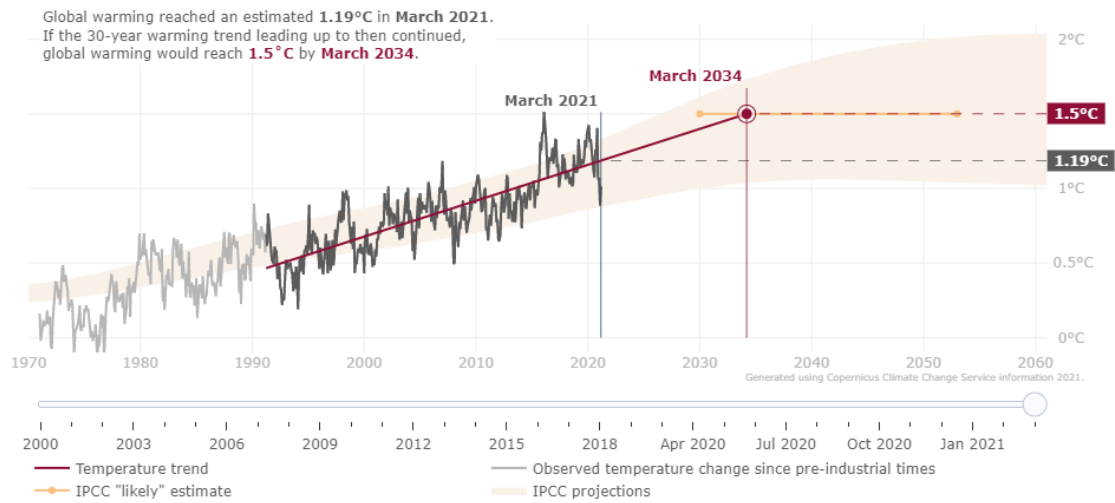


Figura 27. Predicción de temperaturas establecido para un periodo de 30 años, del IPCC, aportado por el programa Copernicus. Fuente: Climate Copernicus.

La gráfica, recogida por el programa Copernicus, muestra la tendencia y la evolución de las temperaturas medias globales del aire a lo largo de los años, desde la era pre-industrial hasta nuestros días y culmina con una predicción para un periodo de 30 años, hasta el año 2060.

Las anomalías de las temperaturas se representan con la línea gris clara y oscura, de forma que se observa un aumento de las temperaturas a partir de 1970 hasta el año 2020. La línea roja y naranja muestran tanto la tendencia de la temperatura medida para un periodo de 30 años en épocas pasadas como la predicción, que culmina en un punto rojo simbolizando el momento en el que se alcanza un aumento de temperaturas mayor a 1.5 ° C. Por lo tanto, el IPCC lanza la hipótesis de que el calentamiento global llegará previsiblemente a 1,5 °C de aumento en la temperatura entre 2030 y 2052 si continúa ascendiendo al ritmo actual.

Esto es simplemente una predicción, pero si se cumple esto se traduciría en un aumento de temperaturas y reducción de precipitaciones, de forma que los glaciares considerados como sistemas únicos y muy amenazados no podrán sobrevivir ante estas condiciones, llegando a su inevitable desaparición.

No sólo supondría una pérdida importante para el paisaje, sino también daños para nuestro ecosistema, al afectar gravemente a nuestra biodiversidad, ya que los glaciares albergan en su interior una gran cantidad de materia y vida orgánica, como virus y bacterias,

algunos de ellos aún por descubrir, como sucede en el caso de los macroinvertebrados, que viven únicamente en cauces alimentados por agua de fusión glaciaria (Snook y Milner, 2000). De hecho, la desaparición de las masas heladas imposibilitaría su estudio e investigación. Además, como se ha mencionado con anterioridad, son sistemas que poseen el control de muchos factores climáticos e hidrológicos, por lo que los riesgos por deglaciación aumentarían, como el desbordamiento de lagos proglaciares, colapsos de glaciares que generan coladas de lodo, deslizamientos... Y, posteriormente, las reservas de agua dulce se reducirían, afectando al consumo humano y al medioambiente.

7. Discusión

El presente trabajo reúne información y conocimientos provenientes de diversos especialistas y diversos campos, como: el glaciario, la paleoclimatología, la geomorfología y la climatología. Desde el punto de vista científico, se constata inequívocamente que los glaciares están en claro retroceso debido a su retroceso por el aumento de temperaturas, siendo un momento crítico en zonas de latitudes medias y bajas, como en el entorno de la cuenca del Mediterráneo. Esto es así hasta el punto de que algunos de ellos ya han dejado de calificarse como tales, para pasar a ser considerados simples masas de hielo estáticas o heleros. Otros han llegado a desaparecer totalmente como es el caso del glaciar de Triglav (Eslovenia), las montañas de Grecia y el Alto Atlas en Marruecos.

Precisamente, esta línea de investigación resulta trascendental no sólo para constatar este suceso, sino también para recoger datos y analizar los procesos que han generado esta situación, así como para investigar las condiciones climáticas en épocas pasadas. Por ello son muy valiosas las aportaciones desde la dendrocronología, liquenometría, radio carbono o carbono -14 (C^{14}), luminiscencia estimulada ópticamente, obtención de isótopos cosmogénicos, varvas glaciolacustres... Además, se ha de mencionar el campo de la teledetección que, gracias a sus continuos avances tecnológicos, permite la observación remota de la Tierra, a través de la utilización de satélites como Sentinel o Landsat, mencionados anteriormente, que aportan valiosos datos e imágenes, como las que se recogen en Google Earth, las cuales se han utilizado en este estudio. Sin lugar a dudas, en la actualidad están adquiriendo una enorme relevancia las fotografías y datos

recogidos por los drones que pueden sobrevolar las cordilleras montañosas y aportar información muy valiosa para este y otro tipo de estudios.

Para la obtención de datos en este trabajo se ha de mencionar la limitación idiomática, ya que algunos datos no se encuentran en inglés, ya que se han tenido que consultar documentos y artículos en los idiomas de cada país, como esloveno, albanés, búlgaro, italiano e incluso árabe. Las dificultades se incrementan a la hora de extraer datos, ya que la mayoría de los institutos geográficos nacionales de los países citados no proporcionan los datos de manera gratuita, ni tampoco utilizan un idioma de uso generalizado en sus páginas web.

Además, otra dificultad destacable ha sido la diferente resolución que presentan los MDE y, como consecuencia, los mapas de sombreado elaborados a partir de ellos, para este estudio. En este sentido, destaca la alta resolución de los modelos de sombreado en los glaciares ubicados en el Pirineo aragonés, al encontrarse en España, ya que se cuenta con un Instituto Geográfico Nacional que permite la descarga de diversa información cartográfica, de forma que la zona del Aneto y Maladeta presenta una mayor resolución (5 m), a diferencia de los demás mapas de sombreado, los cuales detentan un aspecto de menor nitidez, con grandes porciones de píxeles, que restan calidad a las cartografías, al contar con una escasa resolución (25 m). Estos se han obtenido de dos aplicaciones, concretamente: Land Copernicus para todo el resto de los glaciares y heleros, exceptuando el Alto Atlas (Marruecos) cuya información ha sido extraída de la NASA.

Por otro lado, algunas imágenes de Google Earth no poseen la calidad, actualidad y nitidez que sería deseable; precisamente uno de los problemas derivados de la escasa definición de las fotografías reside en la dificultad de distinguir entre nieve y hielo. A ello se le suma la imposibilidad de realizar las necesarias labores de campo y visitar cada una de las masas heladas para la elaboración de este trabajo. Sería muy interesante llevar a cabo un estudio más completo recurriendo a imágenes satelitales de alta resolución, ya que permitiría analizar cada glaciar y helero anualmente, para poder determinar los valores de NDSI y así distinguir la presencia de hielo y/o nieve, ya que es decisivo saber si se conservan o, por el contrario, están extintos. Lógicamente acometer todas estas tareas desbordan un trabajo fin de grado, aunque podría ser una línea de investigación de gran interés científico para ser continuada en futuros estudios. Por tanto, podemos considerar

que el contraste de las imágenes disponibles en Google Earth de años distintos supone una pequeña contribución, que puede servir de punto de partida para el verdadero objetivo a alcanzar: el estudio tanto del glaciario actual como el de la Pequeña Edad del Hielo.

Precisamente, en relación a lo anteriormente comentado acerca de los problemas surgidos tras la extracción de imágenes en Google Earth, en algunas zonas muy altas, las fotografías aéreas se encuentran distorsionadas, a veces solapadas e incluso con errores de ubicación, como es el caso, por poner algunos de los ejemplos más llamativos, del Monte Cilo, que ha tenido que ser cartografiado con la imagen del año 2006, puesto que las posteriores, tanto la de 2013 como la de 2018, parecen estar tomadas en momentos diferentes, como se constata no solamente por la distinta coloración, sino también porque la extensión de las masas de hielo presentan una forma sensiblemente distinta, como se puede apreciar en las siguientes capturas de pantalla, extraídas de Google Earth. Posiblemente esto se ha debido a una toma de imágenes por parte del satélite en diferentes fechas o barridos, pudiendo llegar a provocar una incorrecta interpretación de la extensión y forma de las masas heladas.



Figura 28. Imagen satelital de los glaciares del Monte Cilo, 2013. Fuente: Google Earth.



Figura 29. Imagen satelital de los glaciares del Monte Cilo, 2006. Fuente: Google Earth.

Aunque la mayoría de los expertos consideran que los glaciares están sufriendo un proceso de deterioro irreversible, algunos investigadores lanzan la hipótesis de una “Mini Edad del Hielo”, causada por una disminución en la actividad solar, algo parecido a lo sucedido en la Pequeña Edad del Hielo. A este respecto, muchas organizaciones y expertos han respondido, como la NASA, afirmando que los efectos que podría tener otro Gran Mínimo Solar en las temperaturas de la superficie global podrían enfriar nuestro planeta hasta 0,3° C, en el mejor de los supuestos, de forma que no revertiría el cambio climático inminente, sino que sólo lo retrasaría; ya que se produciría una mínima disminución de la energía del sol que llega a la Tierra, pero esta sería tan leve que en menos de tres se revertiría hasta llegar nuevamente a la situación actual, debido a la creciente e imparable emisión de dióxido de carbono, que produce y emite el ser humano con sus actividades industriales y su forma de vida.

8. Conclusiones

Los glaciares que se encuentran en el ámbito de la cuenca del Mediterráneo poseen una gran importancia, como base de estudio para los cambios climáticos, ya que son grandes registros que contienen preciada información del pasado, sobre todo en este caso de la Pequeña Edad del Hielo.

Tras analizar los glaciares y heleros cercanos a la cuenca del Mediterráneo, se pueden extraer una serie de conclusiones. Aunque la primera de ellas evidencia que todas estas masas están en retroceso e, incluso, algunas de ellas han llegado a desaparecer como es el caso del extinto glaciar Maja e Koljaet en Albania o el glaciar de Triglav en Eslovenia.

El aumento de la temperatura terrestre, sumado a la progresiva escasez de precipitaciones nivales, en estas últimas décadas, está provocando la transformación de glaciares en heleros; es decir perdiendo el dinamismo que les caracteriza, como se puede constatar con el glaciet Snezhnika en Bulgaria, el antiguo glaciar del Calderone en Italia, formando hoy en día dos campos de hielo separados y los heleros ubicados cerca del pico Maja Jezercë en Albania.

En el caso de los pequeños campos de hielo, que miden menos de media hectárea, localizados tanto en el Alto Atlas en Marruecos y en el Monte Olimpo en Grecia, parece inevitable su desaparición; ya que son estacionales y, además, el modelo elaborado por el IPCC, anteriormente mencionado, en el cual predice la hipótesis del aumento anual de temperaturas en 1.5° C, para dentro de un par de décadas o quizás tres, causará la total desaparición tanto de estos campos de hielo, como de la mayoría los glaciares y heleros estudiados.

Una excepción a considerar es el caso de los glaciares en los montes Ala Dagħ y en el Monte Cilo en Turquía. Si bien es cierto que todos ellos han disminuido su extensión, también se constata que, al menos por el momento, esta reducción de sus masas heladas no ha adquirido las dramáticas dimensiones y pérdidas de los casos anteriormente citados.

Para presentar hipótesis más certeras, sería interesante estudiar modelos climáticos futuros de cada zona, a través de los indicadores establecidos por el IPCC con el propósito de plantear predicciones sobre el devenir de los glaciares y heleros. Aunque, sin lugar a dudas, el estudio *in situ* con técnicas de teledetección y sistemas de información

geográfica como es el caso del georradar. Además, las mediciones directas del balance de masa mediante balizas permitirían obtener valores más precisos del espesor del hielo. La dendrocronología, las varvas glaciolacustres, la presencia de carbono 14, entre otros muchos métodos permitirían realizar un exhaustivo trabajo de campo.

Las imágenes satélites gratuitas y disponibles para su consulta en diversas plataformas ofrecen una valiosa información para comprobar los cambios en la forma y extensión de las masas de hielo, aunque carecen de la precisión que sería deseable. Por lo tanto, resulta necesario un análisis más exhaustivo y preciso a partir de imágenes con mayor resolución, procedentes de instituciones o empresas, aunque el alto coste de sus licencias o tarifas dificulta su obtención.

Como conclusión final, es evidente que los glaciares presentan, no sólo en el ámbito europeo, sino también mundial, una valiosa fuente de información para conocer el pasado de la Tierra, analizar el presente y proponer hipótesis para el futuro. Además, debemos recordar que en sus masas heladas se alberga una gran cantidad de vida orgánica congelada en su interior (Marangunic, 2019).

La vida de los glaciares, en especial en el entorno de la cuenca del Mediterráneo, posiblemente esté cercana a su final. Su estudio e investigación es un asunto interdisciplinar en el que la Geología, la Biología, la Climatología, la Historia, la Física y otras muchas áreas de conocimiento científico contribuyen a indagar sobre sus orígenes, causas, efectos... Aunque, sin lugar a dudas, la Geografía reúne y aporta una visión conjunta, de tal manera que su labor es decisiva para poner en valor estos espectaculares paisajes y, a la vez, delicados ecosistemas, cuyo fin último debe ser luchar por su supervivencia, ya que su extinción puede llegar a provocar graves impactos medioambientales como inundaciones, aumento en el número de avalanchas de nieve, alteración del clima y la vegetación, agotamiento de los recursos hídricos...

Una correcta educación ambiental aportaría un mayor respeto y concienciación, aunque las hipótesis científicas apuntan a una inevitable desaparición. Precisamente, por esta razón, resulta esencial recoger toda la información que albergan tanto los glaciares como los heleros, porque forman parte de la vida de nuestro planeta.

9. Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin la gran ayuda de Juan Ignacio López Moreno, investigador del IPE-CSIC (Instituto Pirenaico de Ecología-Consejo Superior de Investigaciones Científicas) experto en glaciares, codirector de este estudio junto con el doctor Alfredo Ollero Ojeda, profesor titular del Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza. Ambos, en todo momento, han respondido con gran celeridad a todas las dudas que iban surgiendo durante su elaboración y han contribuido con interesantes aportaciones. Gracias a ellos un trabajo fin de grado se ha convertido en un constante aprendizaje en un tema tan decisivo como es el estudio de los glaciares, precisamente en el momento en el que su existencia peligra.

También hemos de agradecer la colaboración de Ixeia Vidaller Gayán, graduada en Geología por la Universidad de Zaragoza, por ayudarme a resolver algunas cuestiones en relación al software de Pellitero et al. (2015), para manejarlo con mayor destreza y, así, calcular con mayor precisión la ELA de cada glaciar y helero.

Y, por último, Eñaut Izagirre Estibaritz, licenciado en Geografía por la Universidad del País Vasco, que me ha aportado una valiosa información del extinto glaciar de Triglav (Eslovenia).

A todos ellos, desde estas líneas, dedico mi más sincero agradecimiento.

10. Referencias bibliográficas

Benn, D. y Evans D. J. A (1998). *Glaciers & Glaciations*. Gran Bretaña: Arnold.

Campos, N. (2020). “Revisión de procedimientos metodológicos para la reconstrucción glaciar y el cálculo de la altitud de la línea de equilibrio”. *Revista de Geografía Norte Grande* (76), pp. 321-350. Disponible en: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rgeong/n76/0718-3402-rgeong-76-321.pdf>. (Consultado 8/5/2021).

Chueca Cía, J. (2002). “Comparación de la situación de los glaciares del Pirineo español entre el final de la Pequeña Edad del Hielo y la actualidad”. *Boletín Glaciológico Aragonés*, (3), pp.19-20.

Chuvieco S. E. (2019). *Teledetección Ambiental*. Madrid: Digital Reasons.

Climate Copernicus. (2021). Monitor de tendencia de temperatura global. Disponible en: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/software/app-c3s-global-temperature-trend-monitor?tab=app>. (Consultado 8/5/2021).

Colucci, R. R. y Guglielmin, M. (2015). Precipitation-temperature changes and evolution of a small glacier in the southeastern European Alps during the last 90 years. *International Journal of Climatology* 35, 2783-2797. DOI: [10.1002/joc.4172](https://doi.org/10.1002/joc.4172)

Copernicus. Land Monitoring Service. (2021). UE-DEM. Disponible en: <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem>. (Consultado 10/1/2021).

Dahla, S. O., Bakke, J., Lieb, Ø. y Nesjeb, A. (2003). “Reconstruction of former glacier equilibrium-line altitudes based on proglacial sites: an evaluation of approaches and selection of sites”. *Quaternary Science Review*, 22, (issues 2–4), pp. 275-287. DOI: 10.1016/S0277-3791(02)00135-X

Del Gobbo, C., Colucci, R. R., Forte, E., Čekeda, M. T. y Zorn, M. (2016). “The Triglav Glacier (South-Eastern Alps, Slovenia): Volume Estimation, Internal Characterization and 2000-2013 Temporal Evolution by Means of Ground Penetrating Radar Measurements”. *Pure and Applied Geophysics*. DOI 10.1007/s00024-016-1348-2

Doreface, M., Pecci, M. y Smiraglia, C., (2000). Retreat of Mediterranean Glaciers since the Little Ice Age: Case Study of Ghiacciaio del Calderone, Central Apennines, Italy. *Arctic Antarctic and Alpine Research* 32(2):197-201 DOI:10.1080/15230430.2000.12003355

Gachev, E. (2011). "Inter-annual size variations of Snezhnika glacieret (the Pirin mountains, Bulgaria) in the last ten years", *Studia geomorphologica carpatho - balcanica*, vol. XLV, pp. 47–68. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/285730590_Inter-annual_size_variations_of_Snezhnika_glacieret_the_Pirin_Mountains_Bulgaria_in_the_last_ten_years. (Consultado 10/5/2021).

Gachev, E. y Stoyanov, K. (2012). "Present day small perennial firn-like patches in the mountains of the western Balkan península". *Studia geomorphologica carpatho-balcanica*, 46, pp. 51-70. DOI: 10.2478/v10302-012-000.

Giorgi, F. y Lionello, P. (2008). "Climate change projections for the Mediterranean región". *Global and Planetary Change*, 63, p. 90-104.

Glaciación del hemisferio norte durante la última Edad de Hielo. (2020). En Wikipedia la enciclopedia libre. 14 de septiembre Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Northern_icesheet_hg.png. (Consultado 5/5/2021).

Grunewald, K. y Scheithauer, J. (2010). "Europe's southernmost glaciers: response and adaptation to climate change". *Journal of Glaciology*, 56 (195), pp. 129-142. DOI: 10.3189/002214310791190947

Hughes, P. D. (2014). "Little Ice Age glaciers in the Mediterranean mountains". *Journal of Mediterranean geography*, 122, pp. 63-79. DOI: 10.4000/mediterranee.7146

Hughes, P. D. (2018). "Little ice age glaciers and climate in the mediterranean mountains: a new análisis". *Geographical Research Letters*, 44 (1), pp. 15-45. DOI: 10.18172/cig.3362

Huss, M. y Fischer, M. (2016). “Sensitivity of very small glaciers in the Swiss Alps to future climate change”. *Frontiers in Earth Science* 4 (34). DOI: [10.3389/feart.2016.00034](https://doi.org/10.3389/feart.2016.00034)

IPCC (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza. p. 82.

Lapazaran Izargain, J. J. (2004). *Técnicas de procesamiento de datos de georradar y su aplicación al estudio del régimen termodinámico de los glaciares fríos y politérmicos*. Tesis doctoral inédita. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación. Disponible en: <http://oa.upm.es/223/1/09200443.pdf>. (Consultado 5/6/2021).

Lipar, M., Pérez, A. M., Tičar, J., Pavšek, M., Gabrovec, M., Hrvatin, M., Komac, B., Zorn, M., Zupan Hajna N., Zhao, J. X. y Ferk, M. (2020). “Subglacial carbonate deposits as a potential proxy for glacier’s existence”. *The Cryosphere Discussions*, pp 1-22. DOI: [10.5194/tc-2020-82](https://doi.org/10.5194/tc-2020-82)

Little Ice Age. (2021). En Wikipedia la enciclopedia libre. 9 de mayo. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Little_Ice_Age. (Consultado 4/4/2021)

Marangunic, C. (2019). “Glaciares y los ecosistemas de montaña: Las importantes tareas pendientes”. *Revista de glaciares y ecosistemas de montaña*, pp 11-19. DOI: 10.36580/rgem.i1.11-19

Martínez Vega, J. y Martín Isabel, P. (Eds.) (2010). *Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente*. Madrid: Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CSIC). Disponible en: http://www.aet.org.es/files/guia_teledeteccion_medio_ambiente.pdf. (Consultado 4/5/2021).

Milivojević, M. y Kovačević-Majkić, J. (2005). “Glacial lakes Buni and Jezerce: Albania”. *Glasnik Srpskog Geografskog Društva*, 85. DOI: 10.2298/GSGD0501011M.

Miller, K., Wright, J. D., Katz, M. y Wade, B. (2006). “The Eocene-Oligocene Climate Transition: Antarctic Ice Takes Over. AGU Fall Meeting Abstracts”. *American Geophysical Union (AGU). Fall Meeting Abstracts*. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/253490863_The_Eocene-Oligocene_Climate_Transition_Antarctic_Ice_Takes_Over. (Consultado 5/5/2021).

NASA. EARTH DATA. Open access for open science. Disponible en: [https://search.earthdata.nasa.gov/search/granules?p=C1711961296-LPCLOUD&pg\[0\]\[gsk\]=-start_date&q=dem&circle\[0\]=-20.10938%2C36.26983%2C1335075&tl=1622121117!3!!&m=31.145570660982884!-8.76708984375!7!1!0!0%2C2](https://search.earthdata.nasa.gov/search/granules?p=C1711961296-LPCLOUD&pg[0][gsk]=-start_date&q=dem&circle[0]=-20.10938%2C36.26983%2C1335075&tl=1622121117!3!!&m=31.145570660982884!-8.76708984375!7!1!0!0%2C2). (Consultado 10/5/2021).

NASA Global Climate Change (2013). “There Is No Impending ‘Mini Ice Age’”. Disponible en: <https://climate.nasa.gov/blog/2953/there-is-no-impending-mini-ice-age/>. (Consultado 10/5/2021).

NASA. (2013). Visible Earth. Disponible en: <https://visibleearth.nasa.gov/images/81545/worldwide-glaciers>. (Consultado 5/5/2021).

National Geographic. Moraine. Disponible en: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/moraine/#:~:text=Moraines%20are%20divided%20into%20four,supraglacial%20moraines%2C%20and%20terminal%20moraines.&text=A%20lateral%20moraine%20forms%20along,both%20sides%20of%20its%20path>. (Consultado 12/4/2021).

National Snow & Ice Data Center. (2021) What types of glaciers are there? <https://nsidc.org/cryosphere/glaciers/questions/types.html> (Consultado 10/1/2021).

Osmaston, H., (2005). “Estimates of glacier equilibrium line altitudes by the Area X Altitude, the Area X Altitude Balance Ratio and the Area X Altitude Balance Index methods and their validation”. *Quaternary International*, (138), pp. 22–31. DOI: 10.1016/j.quaint.2005.02.004.

Paleoclimatología (2021). En Wikipedia la enciclopedia libre. 3 de mayo. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Paleoclimatolog%C3%ADa>. (Consultado 4/4/2021).

Pandey, P., Ramanathan, A. y Venkataraman, G. (2015). “Remote Sensing of Mountain Glaciers and Related Hazards” *IntechOpen*, pp. 131-162. DOI: 10.5772/61917

Pellitero, R., Rea, B. R., Spagnolo, M., Bakke, J., Hughes, P., Ivy-Ochs, S., Lukas, S. y Ribolini, A. (2015). “A GIS tool for automatic calculation of glacier equilibrium-line altitudes”. *Computers & Geosciences*, 82, pp. 55-62. DOI: 10.1016/j.cageo.2015.05.005.

Serrano, E., González-Trueba, J. J., Sanjosé, J. J. y Del Río, L. M. (2011). “Ice patch origin, evolution and dynamics in a temperate high mountain environment: the Jou Negro, Picos de Europa (NW Spain)”. *Geografiska Annaler A* 93, pp. 57-70. DOI: [10.1111/j.1468-0459.2011.00006.x](https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2011.00006.x)

Snezhnika. (2021). En: Wikipedia, la enciclopedia libre. 15 de enero. Disponible en: <https://en.wikipedia.org/wiki/Snezhnika>. (Consultado 5/6/2021).

Snook, D. L. y Milner, A. M. (2000). “Macroinvertebrados en arroyos alimentados por glaciares en los Pirineos franceses”. *SIL Proceedings*, 27 (2), pp. 731-734. DOI: 10.1080 / 03680770.1998.11901330

Watts, R. D. y England, A. W. (1976). “Radio-echo sounding of temperate glaciers: ice properties and sounder design criterion”. *Journal of Glaciology*, 17 (75), 39-48. Disponible en: <https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/EBA63698B99522E249581E58A0ACD7A7/S0022143000030707a.pdf/div-class-title-radio-echo-sounding-of-temperate-glaciers-ice-properties-and-sounder-design-criteria-a-href-fn1-ref-type-fn-span-class-sup-span-a-div.pdf>. (Consultado 5/6/2021).